



Institutionen för
VÄRME - OCH KRAFTTEKNIK
Tekniska Högskolan Lund

SOLVÄRMEANLÄGGNINGARS PRESTANDA I
OMRÅDEN MED VÄXLANDE MOLNIGHET

Sven-Erik Ransmark

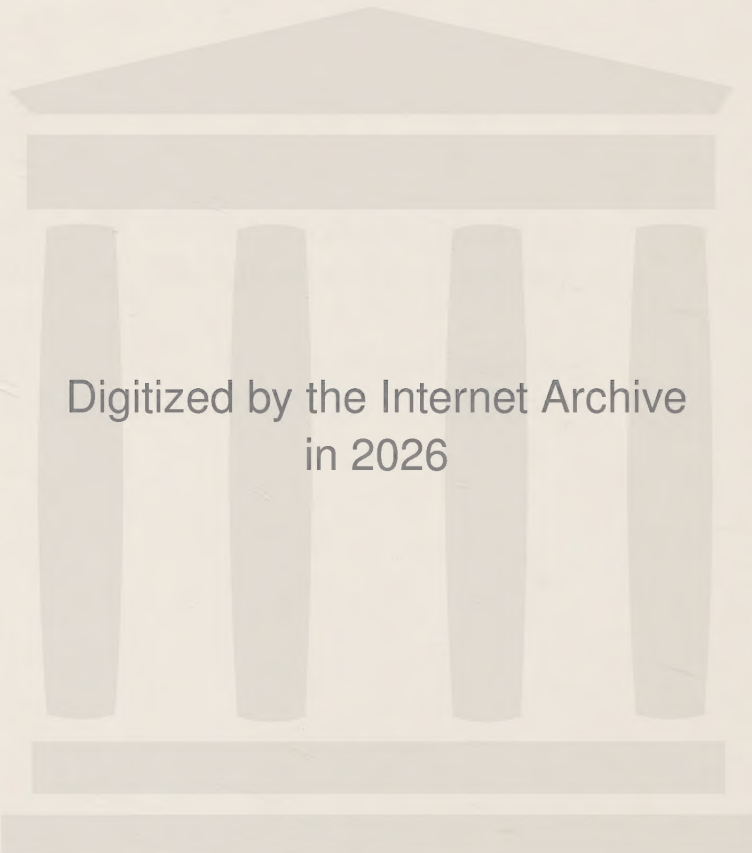
1982.



Institutionen för
VÄRME - OCH KRAFTTEKNIK
Tekniska Högskolan Lund

SOLVÄRMEANLÄGGNINGARS PRESTANDA I
OMRÅDEN MED VÄXLANDE MOLNIGHET

Sven-Erik Ransmark
LUTMDN/(TMVK-1004)/1-172/(1982)



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552406_0026

SOLVÄRMEANLÄGGNINGARS PRESTANDA
I OMRADEN MED VÄXLANDE MÖLNIGHET

av

Sven-Erik Ransmark

Akademisk avhandling som för avläggande av teknisk doktorsexamen
vid tekniska fakulteten vid universitetet i Lund kommer att
offentligen försvaras i sal M:A, Maskinhuset, Lunds Tekniska Hög-
skola, onsdagen den 12 maj 1982, kl 14.00.

Organization: LUND UNIVERSITY		Document no.: DOCTORAL DISSERTATION	
Lund Institute of Technology Division of Heat and Power Engineering		Date of issue: April 1982	
		CODEN: LUTMDN/(TMVK-1004)/1-172/(1982)	
Author(s): Sven-Erik Ransmark		Sponsoring organization:	
Title and subtitle: Solar Heating Performance in Areas with Varying Degrees of Cloudiness			
Abstract: When studying transient processes in solar collectors, information about instantaneous values of varying climate parameters is vital. Statistical average values per hour cannot be used in this context. Data necessary for these studies were mainly based on my own measurements of duration and frequency of sunny and clouded periods respectively in Lund during a two-year period. The dynamic characteristics of the solar collector are described by a time constant determined by the mass of the solar collector parameters multiplied by the heat capacity (mC_p), the loss coefficient (U_L), and the heat removal factor (F_R). For solar collectors with varying heat capacity respectively, the collector temperature and the useful energy of the solar collector are calculated as the dynamic processes and other relevant parameters of the solar collector vary systematically. A transient efficiency factor, η_{tr}, is introduced as the ratio between the actual energy achieved by the solar collector and the energy that should have been achieved had the heat capacity of the solar collector been 0. If the sun is shining the whole day, η_{tr} is close to 1 and thus a very weak function of the heat capacity of the solar collector. On the other hand, during varying cloud, the η_{tr} turns into a strong function of the heat capacity. In addition, η_{tr} decreases with all functions or parameters that reduce the available energy in the steady state case. It shows that the annual mean value of the transient efficiency factor, η_{tr}, is less than the square value of the η_{tr} of the longest day of the year. The hypothesis is put forward that η_{tr} (for the longest day) should be calculated (in Lund) as if the day consisted of consequent periods of 30 clouded and 30 sunny minutes.			
Key words: Solar collector, transient processes, transient efficiency factor, solar heating			
Classification system and/or index terms (if any)			
Supplementary bibliographical information		Language: Swedish	
ISSN and key title		ISBN	
Recipient's notes		Number of pages: 172	
		Price: SEK 200:-	
		Security classification	



Distribution by (name and address) **Lund Institute of Technology, Division of Heat and Power Engineering, P.O.Box 725, SE-220 07 LUND (Sweden)**

I, the undersigned, being the copyright owner of the abstract of the above-mentioned dissertation, hereby grant to all reference sources permission to publish and disseminate the abstract of the above-mentioned dissertation.

Signature *S. Ransmark*

Date 1982-03-19

SUMMARY

The main purpose of this dissertation is the study of transient processes in solar collector systems. Until now, such processes have only been analyzed to a limited extent. Where Sweden is concerned, studies of this type should be of the utmost importance regarding the correct estimation of the amount of useful energy one should expect from different types of solar collector systems.

When studying transient processes in solar collectors, information about instantaneous values of various climate parameters is vital. Statistical average values per hour cannot be used in this context. Data necessary for these studies were mainly based on my own measurements of duration and frequency of sunny and clouded periods respectively in Lund during a two-year period. Among other sources of reference measurements by Lunelund concerning the insolation flux as a function of solar height should be mentioned. The Lunelund data have been analyzed and an equation for the direct insolation flux as a function of time and line of latitude was put forward.

The dynamics of the process of energy storage are analyzed whereas hypothetically the mass of the solar collector is lumped into the absorber plate. The dynamic characteristics of the solar collector are described by a time constant determined by the mass of the solar collector parameters multiplied by the heat capacitivity $(mC_p)_e$, the loss coefficient (U_L) and the heat removal factor (F_R) .

For solar collectors with varying heat capacity respectively, the collector temperature and the useful energy of the solar collector are calculated as the dynamic processes and other relevant parameters of the solar collector vary systematically.

Calculations show that at varying insolation flux the collector temperature is oscillating near a mean value determined by the mean value of the insolation flux, independent of the frequency of the variations. This means that the temperature amplitude will decrease when the insolation oscillation increases, which may mean that a

solar collector which is supposed to give useful energy when looked upon as a static one, does not reach the required temperature level in the dynamic case.

A transient efficiency factor, η_{tr} , is introduced as the ratio between the actual energy achieved by the solar collector and the energy that should have been achieved, had the heat capacity of the solar collector been 0.

If the sun is shining the whole day, η_{tr} is close to 1 and thus a very weak function of the heat capacity of the solar collector. On the other hand, during varying cloud, the η_{tr} turns into a strong function of the heat capacity. In addition, η_{tr} decreases with all functions or parameters that reduce the available effect in the steady state case, i.e. η_{tr} decreases with a rising heat loss coefficient, with a declining transmission-absorption-product, with shorter days, reduced sunshine during the day, with the rising temperature in the solar collector, etc.

It shows that the annual mean value of the transient efficiency factor, η_{tr} , is less than the square value of the η_{tr} during the longest day of the year.

By applying the above conclusions to a series of measurements, independent of my previous analyses, and related to a sun collector plant in Denmark, it has been found that for a given type of plant the η_{tr} varied considerably following the variations in the insolation flux during the daytime. In order to obtain a reliable mean value from this considerable field of research, measurements over a period of many years would be required. Until then, the hypothesis is put forward that η_{tr} (for the longest day) should be calculated - at least in Lund where the chance of sunshine is 50% - as if the day consisted of consequent periods of 30 clouded minutes and 30 sunny minutes respectively.

FÖRORD

En avhandling blir inte till av enbart inspiration och transpiration, utan det erfordras hjälp i form av handledning och uppmuntran och det fordras en stimulerande miljö.

För den skull vill jag nu när min avhandling blivit klar tacka min handledare, professor Stig Borglin, prefekt för Institutionen för Värme- och Kraftteknik och dekanus för Tekniska Högskolan i Lund, för hans värdefulla hjälp och lotsning förbi vetenskapens blindskär.

Jag tackar även institutionens övriga lärare, professor Lennart Thörnqvist och universitetslektor Tord Torisson, för deras råd och uppmuntran och jag tackar nuvarande och tidigare forskarstuderande och andra anställda vid institutionen, vilka i det dagliga arbetet utgjort grogrunden och miljön för inspirerat arbete, och därvid inte minst Carin Hedlund, som renskrivit denna avhandling.

Slutligen vill jag tacka professor Georg Lindgren vid Avdelningen för Matematisk Statistik och docent Jan O. Mattsson vid Naturgeografiska Institutionen inom Lunds Universitet för värdefull hjälp.

<u>INNEHÅLLSFÖRTECKNING</u>	Sida
SUMMARY	I
FÖRORD	III
NOMENKLATUR	3
1. <u>SOLFORSKNING I LUND</u>	9
2. <u>SYFTE OCH AVGRÄNSNINGAR</u>	11
2.1 SYFTE	11
2.2 AVGRÄNSNINGAR	11
3. <u>METODDISKUSSION</u>	13
3.1 PROBLEMOMRÅDEN	13
3.2 KRITISK GRANSKNING AV NUVARANDE METODER INOM DET ANDRA PROBLEMOMRÅDET	14
3.3 METODIK VID HÄNSYNSTAGANDE TILL SOLFANGARENS TRANSIENTER	21
3.4 ARBETSGANG I DENNA STUDIE	23
4. <u>SOLINTENSITET</u>	25
5. <u>UTETEMPERATUR VID KLART RESP. MULET VÄDER</u>	35
5.1 TEMPERATURVARIATIONER UNDER ÅRET	35
5.2 TEMPERATURVARIATIONER UNDER DYGNET	36
6. <u>SOL- OCH MOLNPERIODER I LUND</u>	43
7. <u>GLASFÖRSMUTSNINGENS INVERKAN PÅ TRANSMISSIONEN OCH SOLFANGARENS EFFEKTIVITET</u>	59

	Sida
8. <u>SOLVÄRMEANLÄGGNINGENS TRANSIENTEGENSKAPER</u>	67
8.1 VID UPPVÄRMNINGSFASEN	67
8.1.1 <u>Analytiska uttryck för temperatur- och energitillskott i solfångare</u>	68
8.1.1.1 Vid stillastående fluid, dvs när uttagbar effekt = 0	69
8.1.1.2 Vid cirkulerande fluid, vars inloppstemperatur = utetemperaturen	70
8.1.1.3 Vid cirkulerande fluid, vars inloppstemperatur är godtycklig	73
8.1.1.4 Inklusive rörledningsförluster	76
8.2 VID AVSVALNINGSFASEN	81
8.2.1 <u>Analytiska uttryck för temperatur- och energiändringen i solfångare</u>	81
8.3 VID OMVÄXLANDE UPPVÄRMNING OCH AVSVALNING	83
8.3.1 <u>Beräkning av temperaturförlopp i solfångare med hjälp av analytiska uttryck</u>	83
8.3.2 <u>Beräkning av temperaturförlopp, uttagbar energi och transientverkningsgrad enligt numerisk metod</u>	84
8.3.2.1 Vid fasta sol/molnintervall	84
8.3.2.2 Vid varierande sol/molnintervall	125
8.3.3 <u>Energitillskott och verkningsgrad enligt mätningar</u>	136
9. <u>SLUTSATSER OCH FÖRSLAG TILL YTTERLIGARE STUDIER</u>	142
10. <u>SAMMANFATTNING</u>	143
11. <u>LITTERATURFÖRTECKNING/REFERENSLISTA</u>	145

NOMENKLATUR

A	area	m^2
A _C	absorbatorarea	m^2
A _R	rörledningens omslutningsarea	m^2
A	konstant i ekvation 5.1-5	dagar
a	konstant i ekvation 4.4 och 8.64-65	-
B	konstant i ekvation 5.1-5	dagar
b	konstant i ekvation 4.4	-
b	konstant i ekvation 7.1 och 7.3	-
C _b	värmekonduktans mellan rör och fläns	W/(m K)
C _c	solfångarens värmekapacitet hänförd till en punkt i absorbatorn	J/(m ² K)
C _p	isobar värmekapacitivitet	J/(kg K)
d _i	rördiameter, invändigt	m
d _o	rördiameter, utvändigt	m
e	nat. logaritmbas	-
EXP()	= e()	-
F	(i datorskrift) = v, frekvens	-
F	frekvens i ekvation 6.17	-
F	flänsverkningsgrad	-
F	fördelning i ekvation 8.64	-
F'	solfångarens effektivitetsfaktor	-
F''	solfångarens flödesfaktor	-
F _R	solfångarens värmeomvandlingsfaktor	-
f	frekvens i ekvation 8.65	-
G	massflöde per m ² solfångare	kg/(m ² s)
H	höjd över havet	m
H	daglig globalstrålning mot horisontell yta	J/(m ² dag)
H̄	månadsmedelvärde av daglig globalstrålning mot horisontell yta	J/(m ² dag)
H _o	daglig total extraterrest strålning mot horisontell yta	J/(m ² dag)
H̄ _o	månadsmedelvärde av daglig total extraterrest strålning mot horisontell yta	J/(m ² dag)
h	värmeövergångskoefficient	W/(m ² K)
h _i	värmeövergångskoefficient väggens insida	W/(m ² K)
h	solhöjd över horisonten	grader

I_c	kritisk instrålningensintensitet	W/m^2
I_{DN}	direktstrålning mot yta vinkelrät mot strålningsriktningen	W/m^2
I_d	diffus instrålning mot horisontell yta	W/m^2
I_{dM}	diffus instrålning mot horisontell yta vid medelmolnig himmel	W/m^2
I_{dK}	diffus instrålning mot horisontell yta vid klar himmel	W/m^2
I_{dL_M}	diffus instrålning mot lutande yta vid medelmolnig himmel	W/m^2
I_{dL_K}	diffus instrålning mot lutande yta vid klar himmel	W/m^2
I_{sc}	solkonstanten = extraterresta direktstrålningen vid medelsolavstånd	W/m^2
I_T	total instrålning mot lutande yta	W/m^2
I_r	reflekterad strålning	W/m^2
I_o	infallande strålning	W/m^2
i	infallsvinkel	grader
K	extinktionskoefficient	m^{-1}
K	vinkelkorrektionskoefficient	-
k	koefficient i ekvation 6.1-6.22	-
k	konstant i ekvation 8.64-65	-
k_p	värmeledningskoefficient (absorbator)	$W/(mK)$
L	strålningensväg i glas	m
m	massa	kg
m	relativ atmosfärtjocklek	-
$(mC_p)_c$	solfångarens värmekapacitet	J/K
$(mC_p)_{C_e}$	solfångarens effektiva värmekapacitet	J/K
$(mC_p)_{(C+R)_e}$	solfångarens + rörledningens effektiva värmekapacitet	J/K
$(mC_p)_e$	effektiv värmekapacitet	J/K
$(mC_p)_i$	i:te skiktets värmekapacitet	J/K
$(mC_p)_p$	absorbatorns värmekapacitet	J/K
$(mC_p)_R$	rörledningens värmekapacitet	J/K
$\dot{m}$	massflöde	kg/s
M	atmosfärtjocklek	m
N	antal dagar	styk

n_D	dagnummer från årets början	
n	exponent i ekvation (6.1)	
Q	energi	J, kWh
$\dot{Q}$	effekt	J/s, W, kW
q	energi per m^2 solfångare	J/m^2
q_L	förlustenergi per m^2 solfångare	J/m^2
q_L^Z	förlustenergi per m^2 solfångare när massan $C_c=0$	J/m^2
$\dot{q}$	effekt per m^2	W/m^2
$\dot{Q}_L$	värmeförlust från solfångare	W
$\dot{Q}_R$	värmeförlust från rör	W
$\dot{Q}_{R_s}$	värmeförlust i rörledningen mellan magasin och solfångare	W
Q_u	användbar energi från en solfångare	W
$\dot{Q}_u$	användbar effekt från en solfångare	W
$\dot{Q}_{u_s}$	användbar effekt från en solfångare inkl. rörsystem	W
$\dot{q}_u$	användbar effekt från en plan solfångare per m^2	W/m^2
P	(i datorskrift) = λ , periodlängd	minuter
S	absorberad solstrålning per m^2	W/m^2
T	temperatur	$^{\circ}C$, K
T_a	omgivningstemperatur	$^{\circ}C$
$\bar{T}_a$	dygnsmedeltemperatur	$^{\circ}C$
$\bar{T}_{a_K}$	dygnsmedeltemperatur, klara dagar	$^{\circ}C$
$\bar{T}_{a_M}$	dygnsmedeltemperatur, mulna dagar	$^{\circ}C$
T_{a_K}	omgivningstemperatur, klara dagar	$^{\circ}C$
T_{a_M}	omgivningstemperatur, mulna dagar	$^{\circ}C$
T_f	fluidens medeltemperatur	$^{\circ}C$
T_g	glastäckningens temperatur	$^{\circ}C$
T_g^Z	glastäckningens temperatur om massan $C_c=0$	$^{\circ}C$

T_i	fluidens inloppstemperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_M	värmemagasinet botten temperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_m	fluidens medeltemperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_p	absorbatorplätens medeltemperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_R	rörledningens temperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_u	fluidens utloppstemperatur	$^{\circ}\text{C}$
t	tid	s
t_{T_i}	tiden när temperaturen är T_i	s
t	timvinkel	grader
U_b	värmeförlustkoefficient för solfångarens baksida, per m^2 solfångare	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
U_e	värmeförlustkoefficient för solfångarens kanter, per m^2 solfångare	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
U_t	värmeförlustkoefficient för solfångarens täckskiva, per m^2 solfångare	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
U_L	solfångarens värmeförlustkoefficient ($U_b + U_e + U_t$)	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
U_o	solfångarens värmeförlustkoefficient när temperaturen relateras till fluiden	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
U_R	rörledningens värmeförlustkoefficient	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
W	röravstånd	m
x	konstant i ekvation 4.5	h
y	konstant i ekvation 4.5	h
α	absorptionskoefficient (absorberad strålningsandel)	-
γ	solfångarens lutning mot horisontalplanet	grader
γ'	lutning mot horisontalplanet för solfångarens ytnormal	grader
δ	solens deklination	grader
δ_p	tjocklek (absorbatorplatta)	m
η	verkningsgrad, effektivitet	-
η_{tr}	transientverkningsgrad	-
θ	strålningsvinklar	grader
θ	timme från soluppgång	h
λ	periodlängd	minuter
λ_D	dagens längd	minuter
ν	frekvens	-/dag

ρ	reflekterad strålningsandel	-
σ_m	sannolikhet för moln	-
σ_s	sannolikhet för sol	-
τ	tid i timmar från årsskiftet	h
τ	tidskonstant	s
τ	transmissionskoefficient (transmitterad strålningsandel)	-
τ^*	skenbar tidskonstant	s
τ_m	molntid	minuter
τ_s	soltid	minuter
$(\tau\alpha)$	transmissions-absorptionsprodukt	-
ϕ	latitud	grader
ϕ	andel strålning $> I_c$	-

1. SOLFORSKNING I LUND

John Ericsson försökte för mer än ett sekel sedan kvantifiera solenergin. Genom att mäta hur mycket is solen förmådde smälta på en yta av 10 fots fyrkant räknade han fram, att värmeutvecklingen på samma yta på solen måste motsvara en förbränning av mer än 200 000 skålpund kol i timmen. I ett brev (11) till Filosofiska Fakulteten i Lund 1868 med anledning av att han vid universitetets "andra sekularjubileum" detta år promoverades till filosofie hedersdoktor, skriver han: "Tanken kan ej fatta intensiteten af ett förbrännings-fenomen, som representeras af en sådan utomordentlig konsumtion af kol. Ännu mindre kunna vi göra oss något begrepp angående den brinnande materiens natur och tillräcklighet, då en sådan intensiv värme oupphörligen underhålles öfver hela ytan af ett klot, hvars diameter är öfver ett hundra gånger större än jordens diameter!... Tillåt mig fråga, innan jag slutar denna ofullständiga berättelse: hvem kan förutse, hvad inverkan en outtömlig drifkraft kommer att utöfva på civilisationen och jordens förmåga att fylla vårt släktes behovver?"

Ericsson fastställde således storleken på solarkonstanten långt innan begreppet var konstruerat. Omräknat till SI-enheter ger Ericssons kolförbrukning - om man räknar med 80% verkningsgrad vid energiomvandlingen - samma soleffekt per m^2 , som nutida satellitmätningar kommit fram till.

Vid Naturgeografiska Institutionen inom Lunds Universitet registrerade och bearbetade man klimatdata under åren 1941-1974. Dessa data ingår i den officiella svenska klimatstatistiken. Grundmaterialet finns fortfarande arkiverat hos naturgeograferna (27) och jag har haft tillfälle att jämföra mina mätningar av solperiodernas längd och frekvens med detta grundmaterial.

1975 påbörjades ett större forskningsprojekt - Resursbesparande byggande - i vilket flera institutioner vid Tekniska Högskolan i Lund deltog. Denna forskning, som bekostades av Statens Råd för Bygg-

nadsforskning, delades upp på olika sektorer. Institutionen för Arkitektur (Carl-Hugo Olsson och Krister Wiberg) ägnade sig åt forskning kring byggnaders formgivning och orientering för att byggnaderna på bästa sätt skulle utnyttja solenergin. Institutionen för Byggnadskonstruktionslära (Bo Adamson) ägnade sig åt forskning kring det enskilda husets och dess solvärmeanläggnings konstruktion, medan Institutionen för Värme- och Kraftteknik ägnade sig åt forskning kring större solvärmecentraler för bostadsuppvärmning.

Själv hade jag tillfälle att redan från början deltaga i detta projekt. Därvid listades de problem som fanns för solteknik för svenska förhållanden. Ett av problemen var varför utförda solvärmeanläggningar inte gav det energiutbyte man beräknat. Överoptimistiska verkningsgradsuppgifter för solfångarna kunde inte ensamt förklara den många gånger stora diskrepansen mellan beräknat och erhållet energiutbyte. Ett omfattande litteraturstudium och kontakter med forskare på utländska symposier gav ej heller svar på denna fråga.

Efter hand utkristalliserades frågan: Kan det vara så, att de amerikanska undersökningarna som visade att transientförsluster i stort sett kunde negligeras, inte gällde för svenska klimatförhållanden?

Tillgänglig klimatstatistik har inte tillräcklig upplösning för att kunna användas vid transientberäkningar och det skulle ta en mansålder att samla in data för att säkerställa statistisk signifikans. Detta förhållande kunde inte avhålla mig från att söka svar på frågan. I denna avhandling redovisar jag resultatet av mitt arbete.

En historisk bakgrund på global basis framgår av bl a McWeigh (26).

2. SYFTE OCH AVGRÄNSNINGAR

2.1 SYFTE

Syftet med denna studie är att undersöka om min hypotes är riktig att det är solvärmeanläggningens transientegenskaper i kombination med klimatets dynamik, som är anledningen till den diskrepans som konstaterats råda mellan på traditionellt sätt teoretiskt beräknade energitillskott från svenska solvärmeanläggningar och de i praktiken erhållna.

När parametrarna som styr energiutbytet, är klarlagda till betydelse och storlek, ges inte bara möjlighet att bättre kunna förutberäkna energiutbytet och därmed möjliggöra en bättre dimensionering av solvärmeanläggningen, utan ges även besked om på vilket sätt solfångarna kan förbättras så att de ger mer energi.

2.2 AVGRÄNSNINGAR

För att undersöka riktigheten i hypotesen som framförs i förra avsnittet, behöver inte alla typer av solfångare studeras, ty inverkar transienterna på en solfångartyp inverkar de även på andra. Av denna anledning och dessutom för att bringa ned räknetiden, vilken trots detta blir ganska omfattande, har jag gjort en del avgränsningar och förenklingar. Sålunda genomförs beräkningar enbart för plana solfångare med vatten som fluid och med placering i Lund. Övriga avgränsningar eller förenklingar framgår av respektive kapitel. I kapitel 9 diskuterar jag i vad mån gjorda avgränsningar påverkar resultatens generaliserbarhet.

3. METODDISKUSSION

3.1 PROBLEMOMRÅDEN

Solenergiteknik kan ur metodisk synpunkt indelas på flera sätt. Ett förslag till strukturering i problemområden har angivits av Borglin (4):

Första problemområdet.

Att kunna beräkna den energi, som på grund av den från solen emitterade strålningen under en viss tidsperiod infaller mot ett plan, som är godtyckligt orienterat i förhållande till ett på jordytan placerat horisontalplan.

Andra problemområdet.

Att kunna beräkna den energi, som på grund av den av solen emitterade strålningen under en viss tidsperiod kan upptagas av en solkollektor och med hjälp av denna omvandlas till en annan energiform.

Tredje problemområdet.

Att kunna utforma och beräkna det system, med vars hjälp den under en viss tid från solkollektorn uttagbara energin kan tillgodogöras för ett nyttigt ändamål.

Som framgått av tidigare kapitel 2 syftar jag i detta arbete till att visa olika parametrars inverkan på en solvärmeanläggning och då speciellt solfångarens transienter. Tyngdpunkten i mitt arbete kan härmed sägas falla inom det andra problemområdet. Resultatet från mina studier torde vara av betydelse för möjligheterna att genomföra konstruktiva och beräkningsmässiga uppgifter inom det tredje problemområdet.

Resterande del av detta kapitel kommer att ägnas åt en kritisk granskning av den grundläggande beräkningsmetodik som hittills karakteriserat det internationella arbetet inom det andra problemområdet. Jag kommer vidare att beskriva i sina huvuddrag den beräkningsmetodik som kommer att användas i denna studie, med sikte på att också solvärmeanläggningens transienter skall kunna behandlas. Kapitlet avslutas med en kortfattad beskrivning av arbetsgången i studien som helhet.

3.2 KRITISK GRANSKNING AV NUVARANDE METODER INOM DET ANDRA PROBLEMOMRÅDET

De metoder som användes för att beräkna vilken effekt man får från en solfångare, baseras alla på Hottel-Williers modell (14):

$$\dot{Q}_U = F_R A [I_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)]^+ \quad (3.1)$$

(+ anger att endast positiva värden medtages.)

Ekvation (3.1) anger att uttagbar energi är skillnaden mellan av absorptorplattan absorberad strålningsenergi och från solfångaren till omgivningen förlorad energi. Den senare är proportionell mot temperaturskillnaden mellan absorptor och omgivningen. Eftersom absorptortemperaturen i allmänhet inte är känd, sker beräkningen med utgångspunkt från fluidens inloppstemperatur och korrigering sker med hjälp av faktorn F_R , som härleddes av Bliss (3):

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{F' U_L A}{\dot{m} C_p}\right) \right] \quad (3.2)$$

vari

$$F' = \frac{U_o}{U_L} \quad (3.3)$$

För normala absorptorer, bestående av runda rör och mellanliggande flänsar, erhålles U_o ur sambandet (10):

$$\frac{1}{U_o} = W \left[\frac{1}{U_L d_o + (W - d_o) F} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi d_i h_i} \right] \quad (3.4)$$

vari

$$F = \frac{\tanh\left[m\left(\frac{W - d_o}{2}\right)\right]}{m\left(\frac{W - d_o}{2}\right)} \quad (3.5)$$

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k_p \delta_p}} \quad (3.6)$$

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (3.7)$$

U_L är en funktion av solfångarekonstruktion och temperaturnivå. Ett approximativt värde på U_L kan beräknas ur ekvation uppställd av Klein (18).

Genom att beräkna $\dot{Q}_U$ timme för timme och summera, erhålles den uttagbara energin för en längre tidsperiod. Åtskilliga exempel finnes i litteraturen, t ex i Duffie & Beckman (10).

För att nedbringa erforderligt räknearbete har olika forskare utarbetat metoder som ϕ -, f - och ϕ, f -chartmetoderna (8, 14, 17, 19, 20, 23, 29, 34, 35). Principiellt är metoderna lika. De utgår från ett samband mellan strålningen vid jordytan, H , och strålningen utanför atmosfären, H_0 , (22) och de bygger på medelvärden, men medelvärden för olika lång tid. Man utgår från det faktum, att instrålningen måste överskrida ett visst kritiskt värde, I_c , för att solfångaren skall ge effekt. Detta värde erhålles genom att sätta ekv. (3.1) lika med noll. Detta ger

$$I_c = \frac{U_L(T_i - T_a)}{(\tau\alpha)} \quad (3.8)$$

Den uttagbara effekten kan då skrivas

$$\dot{Q}_U = A F_R (\tau\alpha)(I_T - I_c)^+ \quad (3.9)$$

Genom integration för en månad med avseende på tiden erhålles

$$Q_U = \int_{\text{mån}} A F_R (\tau\alpha)(I_T - I_c) dt \quad (3.10)$$

Detta sättes lika med

$$Q_U = A F_R (\overline{\tau\alpha}) \bar{H}_T N \bar{\phi} \quad (3.11)$$

Metoderna går ut på att göra en modell över den mängd strålningsenergi som ligger över den kritiska. Då ingen av dessa modeller tar hänsyn till solfångarens massa, beaktar de härigenom ej heller transientegenskaperna.

Rabl (29) anger också uttryckligen bland förutsättningarna för sin modell:

- * timupplösning
- * ej hänsyn till transienter
- * kollektorn utnyttjar all energi över den kritiska instrålningen med konstant verkningsgrad.

Duffie och Beckman (10) redogör för en studie angående värmekapacitetens betydelse, vilken studie författarna gjort tillsammans med Klein (16). Sammanfattningen är att värmekapaciteten inverkar på

- * längden av uppvärmningsperioden på morgonen
- * klimatparametrarnas (strålning, temperatur och vind) betydelse för effektiviteten.

Författarna anser att första punkten kan vara signifikant men kan negligeras i många fall, att andra punkten alltid kan negligeras för normala kollektorkonstruktioner.

Eftersom författarna synes utgå från ett soligare och mindre molnrikt klimat än det svenska och eftersom man räknar med timmedelvärden är det naturligt att man drar dessa slutsatser. I någon mån påverkas kanske också slutsatserna av den definition på transientförluster som man gör i den ovannämnda studien (16). Förlusterna från en solfångare med termisk massa beräknas ur

$$q_L = \int_0^t \bar{h} (T_p - T_g) dt \quad (3.12)$$

och för en solfångare utan termisk massa ur

$$q_L^z = \int_0^t \bar{h} (T_p^z - T_g^z) dt \quad (3.13)$$

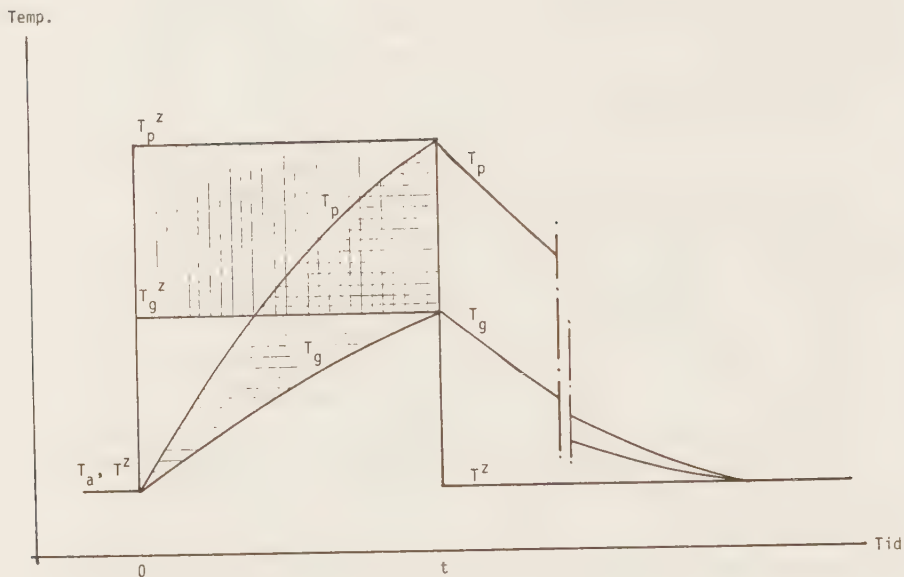
(z står för zero-capacitance.)

Skillnaden mellan ekvationerna (3.12) och (3.13) anges som transientförluster för solfångaren med termisk massa. Enligt ett antal beräkningar, som ej visats, skulle transientförlusterna vara mindre än 0,5% av den uttagbara energin för en solfångare med ett glas. Har solfångaren två eller tre glas, blir transientförlusten ytterligare lägre.

Enligt min uppfattning är emellertid transientförlusten
= utebliven uttagbar energi.

Figur 3.1 visar schematiskt en tänkt sekvens. Utgångsläget är att det är mulet och solfångarna har omgivningens temperatur. Vid $t = 0$ kommer solen fram och är sedan framme just så länge att solfångaren med termisk massa skulle börja ge effekt. Värmeförlusten under denna tid till omgivningen erhålles ur ekv. (3.12) resp. (3.13). $\bar{h}$ i dessa ekvationer är medelvärden och kan för den skull betraktas som konstant i integralen. Antages konstanten, som representerar effekt per K, lika i de båda integralerna, representeras värmeförlusterna i de båda fallen av de schrafferade ytorna i figur 3.1. Som synes blir förlusten för nollkapacitets-solfångaren under denna period ungefär dubbelt så stor som förlusten från solfångaren med värmekapacitet. Enligt den amerikanska definitionen på transientförluster blir denna negativ, dvs det skulle bli fråga om vinst för solfångaren med värmekapacitet. I själva verket ger denna solfångare ingen uttagbar energi under den betraktade tiden, vilket solfångaren utan termisk massa gjort. Den senare solfångaren intar, så fort solen kommer fram, ett nytt fortfarighetstillstånd och har givit effekt hela tiden solen varit framme. Den för det tröga systemet uteblivna uttagbara energin betraktar jag som detta systems transientförluster.

Under molnperioden blir det inga värmeförluster från nollkapacitets-solfångaren, vilket det däremot blir från solfångaren med värmekapacitet. Förekommer det inga moln inträder avsvältningsperioden först när solintensiteten inte längre räcker till att hålla solfångaren vid önskad temperatur. Gäller integrationsgränserna i ekv. (3.12) och (3.13) för den tid instrålningen överstiger den kritiska, I_c , kommer avsvältningsförlusterna inte med.



Figur 3.1 Ekvation 3.12 och 3.13.

Klein et al (16) och Duffie & Beckman (10) använder vid sina transientberäkningar en modell som utvecklats av Close (7) för beräkning av solfångarens effektiva värmekapacitet. Vid denna modell låter man en punkt i absorbatoren representera hela solfångaren och denna punkts temperatur antas råda i hela solfångaren.

Close anger att han funnit att en intermittent instrålning kan vid simuleringar ersättas av en sinuskurva. För att visa detta genomför han beräkningar för två olika instrålningsförhållanden, nämligen

$$I = 200 \sin \pi \theta / 12 \quad \text{BTU}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) \quad (3.14)$$

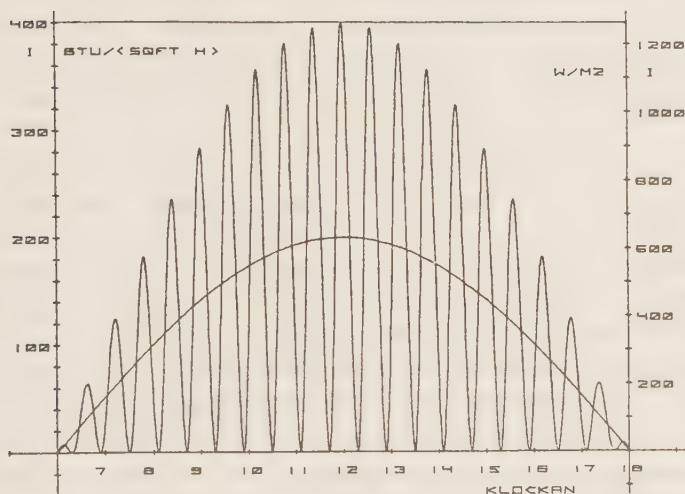
och

$$I = (200 \sin \pi \theta / 12)(1 + \cos 40 \pi \theta / 12) \quad \text{BTU}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) \quad (3.15)$$

båda ekvationerna givande $1528 \text{ BTU}/(\text{ft}^2 \cdot \text{dag})$.

$(200 \text{ BTU}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) = 631 \text{ W}/\text{m}^2$, $1528 \text{ BTU}/(\text{ft}^2 \cdot \text{dag}) = 4,82 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ dag})$

Bäst uppfattning om intensitetens variation enligt dessa ekvationer får man om man ritar upp kurvorna, vilket jag gjort i figur 3.2.



Figur 3.2 Ekvation 3.14 och 3.15.

Close har beräknat systemverkningsgraden för några olika fall och visar att skillnaden vid användandet av de båda instrålningsfunktionerna blir endast ett par procentenheter (till den intermittenta strålningens fördel). När man visuellt blir varse hur instrålningen varierar enligt de båda funktionerna, inser man genast att förhållandet mellan verkningsgraderna beräknade enligt de båda ekvationerna blir starkt beroende av vilken temperaturnivå som gäller. Detta gör att metoden inte kan användas generellt. Beräknar man medelvärdet av instrålningen timme för timme ger de båda ekvationerna samma resultat, men då har man byggt in en felkälla.

I ekvation (3.1) utgör termen $I_T(\tau\alpha)$ den under tidssteget (1 h) absorberade energimängden. Ville man ta hänsyn till kollektorns massa, skulle användbara effekten $\dot{Q}_U$ reduceras (ökas) med den under tidssteget ökade (minskade) energiupplagringen. Efterson I_T är medelvärden medför detta att ändringen i kollektortemperatur är av storleksordningen 1 K per timme.

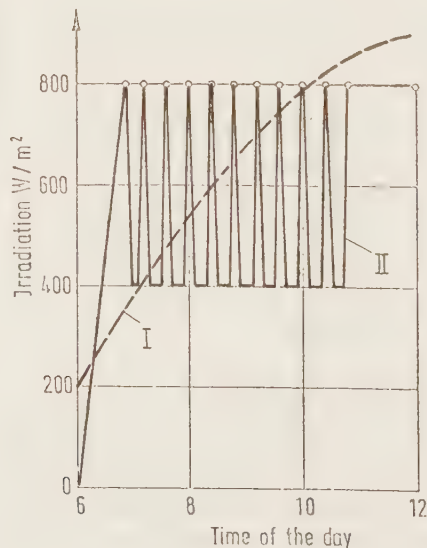
Detta medför en mycket liten ändring i energiupplagring och dessutom återvinner man det mesta i avsvlningsfasen av det man förlorar i uppvärmningsfasen. Detta visar sig också i den kalkyl Duffie redovisar som belägg för att transienter har negligerbar inverkan.

Ekvation (3.) gäller således endast när solfångaren är i drift och är därför inte lämplig som utgångspunkt för transientberäkningar.

Även om bevismaterialet kan diskuteras, så påpekade Hahne (13) 1978, att transienter bör beaktas i solvärmeanläggningar. Påpekandet skedde när Hahne i Kairo på International Symposium - Workshop on Solar Energy presenterade en uppsats, i vilken några olika kollektorkonstruktioner jämfördes vid två olika instrålningsförhållanden, dels vid konstant solsken (med sinusformad effekt under dagen) - fall I -, dels varierande instrålning mellan 800 och 400 W/m^2 effekt - fall II - se figur 3.3. Denna testfunktion för att visa dynamikens betydelse, gav till resultat enligt de visade exemplen, att solfångarna värmdes upp snabbare vid den periodiska irradiansen, fall II, än vid ständigt solsken, fall I, medan verkningsgraden blev lägre för fall II än för fall I.

Figur 3.3

Olika instrålningsförhållanden enligt Hahne (13).



Hahnes resultat vill jag kommentera som följer:

Eftersom uppvärmningen gick snabbare för fall II än för fall I, måste medeleffekten vid det förstnämnda fallet ha varit större än vid det senare - åtminstone fram till dess solfångaren ger uttagbar effekt. Att så också varit fallet framgår av figuren. Figuren visar också, att om man tar hänsyn till instrålningen under hela dagen, blir medelinstrålningen för fall I ca 650 W/m^2 och för fall II ca 500 W/m^2 .

Vid en högre instrålningseffekt blir verkningsgraden högre även vid stationära förhållanden om jämförelsen sker vid i övrigt lika förhållanden. Den redovisade lägre verkningsgraden för fall II inrymmer således det sammanlagda inflytandet av lägre instrålningseffekt och varierande instrålningseffekt. Vid simuleringarna var skillnaden mellan vattnets inloppstemperatur och omgivningens temperatur endast 15 K, ($35 - 20^\circ\text{C}$).

Den lägsta instrålningseffekten, 400 W/m^2 , i fall II var således större än kollektorns termiska förlusteffekt, vilket medfört att produktionen av uttagbar energi inte avbrutits under simuleringen. Under sådana betingelser är det troligt, att den lägre verkningsgraden för fall II mera beror på den lägre instrålningsintensiteten än på variationer i instrålningseffekt.

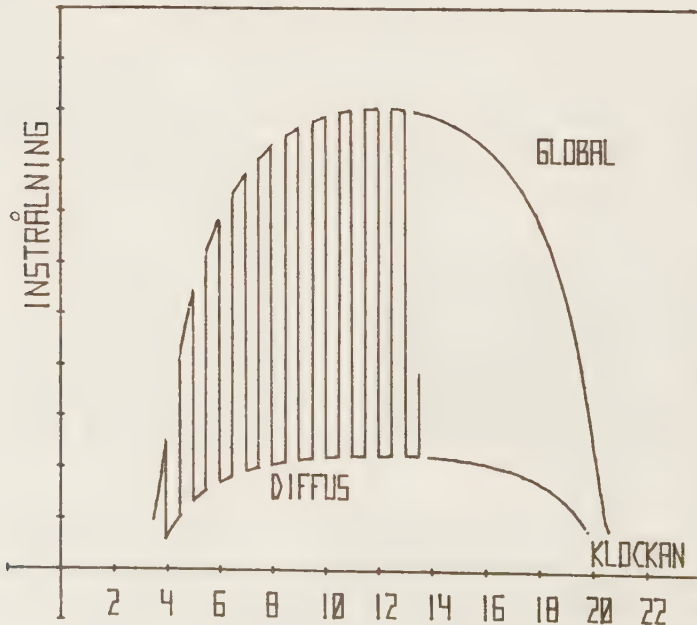
3.3 METODIK VID HÄNSYNSTAGANDE TILL SOLFÅNGARENS TRANSIENTER

En sådan beräkningsmetod måste ta hänsyn till hur klimatparametrarna inverkar på solvärmeanläggningens transienter eller hur klimatdynamiken inverkar på solvärmeanläggningens dynamik, samt i sin tur hur transienterna påverkar den användbara energi som kan tas ut från solfångaren.

Tillgängliga klimatdata återspeglar inte klimatets dynamik p g a att de är medelvärden över för lång tid, och kan därför ej användas vid transientberäkningar. Även om data med tillräcklig upplösning

förelagt, hade dessa varit mindre lämpade att använda vid beräkning av solfångarnas transientegenskaper, ty beräkningarna skulle ge det samlade resultatet av solfångarens resp. klimatets inverkan, och det skulle vara svårt att särskilja den ena eller den andra påverkansfaktorns inverkan. För att kunna påvisa olika konstruktionsparametrars betydelse för effektiviteten vid transienta förlopp, har jag använt syntetiska dagar, sammansatta av hypotetiskt växlande sol- och molnperioder. Vid sol utsätts solfångarna för globalstrålning och vid moln för diffus strålning, som visas schematiskt i figur 3.4. Längden på sol- och molnperioder varieras systematiskt. Solstrålningens intensitet samt uteluftens temperatur vid dessa växlingar antas följa medelvärdet för tiden ifråga.

Använd beräkningsmodell fastställer solfångarens temperatur som funktion av tiden och med hänsynstagande till solfångarens massa. Med hjälp av den beräknade temperaturen beräknas förlusterna och uttagbar effekt.



Figur 3.4 Instrålning momentant växlande mellan global och diffus strålning.

3.4 ARBETSGANG I DENNA STUDIE

För att kunna påvisa transienternas betydelse för en solvärmeanläggnings effektivitet har jag systematiserat kunskapsuppbyggnaden på följande sätt. Jag

- 1) analyserar nuvarande beräkningsmodeller,
- 2) utvecklar från kända data ekvationer för
 - utetemperaturens variation med tiden;
 - direkta solstrålningens intensitet som funktion av tiden,
- 3) mäter och registrerar sol- och molnperiodernas längd och frekvens i Lund under en tvåårsperiod och ställer på basis av erhållna data upp en fördelningsekvation för sol- och molnperioder,
(Mätdata har sammanställts i en särskild institutionsrapport (30))
- 4) inför syntetiska dagar för att med hjälp av systematiska parametervariationer kunna påvisa olika konstruktionsparametrars inverkan på transienterna,
- 5) mäter försmutsningens inverkan på solstrålningens transmission genom glas vid olika infallsvinklar och beräknar med hänsyn härtil den uttagbara energin vid transienta förlopp,
- 6) analyserar uppvärmnings- och avsvlningsförloppet i solfångare och rörsystem samt inför en tidskonstant, som är baserad på konstruktions- och driftsparametrarna C_c , U_L och F_R ,
- 7) gör beräkningar av den uttagbara energin vid gynnsam respektive ogynnsam fördelning av givna sol- och molnperioder för att därur få fram "genomsnittsdagar",
- 8) inför begreppet transientverkningsgrad,

- 9) analyserar mätningar av en solvärmeanläggning i Danmark och beräknar denna anläggnings transientverkningsgrad vid olika tillfällen och jämför denna verkningsgrad med den som beräknats teoretiskt.

4. SOLINTENSITET

Solintensiteten varierar under året och under dagen på grund av att jordens avstånd från solen varierar, att solstrålarnas vägsträcka genom jordatmosfären varierar och att atmosfärens turbiditet varierar. Genom att bearbeta Lunelunds (25) mätdata från sex års mätningar av direktstrålningens intensitet klara dagar, har jag kunnat ställa upp en ekvation för atmosfärens transmission av solstrålning som funktion av tid, dvs en ekvation för beräkning av transmissionskoefficienten $\tau_{DN} \cdot \tau_{DN}$ multiplicerad med solar-konstanten, I_{SC} , ger intensiteten av direktstrålningen, dvs

$$I_{DN}(t) = \tau_{DN}(t) \cdot I_{SC}(t) \quad (4.1)$$

Solarkonstanten är vid jordens medelavstånd till solen enligt Thekaekara (37)

$$I_{SC} = 1353 \text{ W/m}^2 \quad (4.2)$$

Eftersom avståndet mellan solen och jorden varierar under året erhålles

$$I_{SC}(t) = 1353 + 45,5 \sin(92 - n_D)360/365 \quad (4.3)$$

n_D är dagnumret räknat från 1 januari.

$$\tau_{DN}(t) = \text{Exp} \left[- (a+b)(t) \cdot m(t) \right] \quad (4.4)$$

vari $(a+b)$ är extinktionskoefficienten och m är den relativa atmosfärsmassan.

Genom anpassning till Lunelunds mätdata har jag funnit

$$(a+b)(t) = 0,07 + \left\{ 0,240 + 0,035 \sin \phi \cos \left[\frac{(\tau+x)180}{y} \right] \right\} \sin^{0,55} h \quad (4.5)$$

ϕ är deklinationen, τ är timmar från årets början och x och y ger svängningspunkterna.

För $\tau < 4728$ timmar sättes $x = y = 5100$ och
för $\tau > 4728$ timmar sättes $x = y = 4500$.

Atmosfärsmassan m erhålles ur

$$m = \frac{\sqrt{6380^2 + \sin^2 h - 1} 6370^2 - 6370 \sin h}{10} \quad (4.6)$$

m :s tidsberoende är relaterat till solhöjden h . Beräkning av solhöjden ingår i det som i kapitel 3 kallas första problemområdet och formlerna härför finnes upptagna i åtskilliga textböcker, t ex Lodén et al (24):

$$\sin h = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos t \quad (4.7)$$

vari timvinkeln t för timmen τ är

$$t = [\tau - 24 \cdot \text{integer}(\tau/24) - 12] \cdot 15 \quad (4.8)$$

Deklinationen δ beräknas ur

$$\sin \delta = \sin [(\tau - 1902)360/8766] \sin 23,45^\circ \quad (4.9)$$

Om instrålningsförlusten tecknas I_f så gäller

$$I_f = I_{SC} - I_{DN} \quad (4.10)$$

Extinktionskoefficienten enligt ekvation (4.5) gäller vid havets nivå. Vid högre höjder blir instrålningsförlusten lägre på grund av att strålningen har kortare väg att passera genom atmosfären. Enligt Bossel (5) är förlusten som funktion av höjden över havet, H ,

$$I_f(H) = I_f|_{H=0} \cdot e^{-aH} \quad (4.11)$$

med $a = 0,00014/m$.

Ekvation (4.1) kombinerad med ekvation (4.10) och (4.11) kan då skrivas

$$I_{DN}(t) = \left\{ 1 - [1 - \tau_{DN}(t)] e^{-aH} \right\} I_{SC}(t) \quad (4.12)$$

Figur 4.1 visar grafiskt ekvation (4.1) tillsammans med Lunelunds värden för olika solhöjder under året i Helsingfors.

1974 bearbetade Brown och Isfält (6) Lunelunds data och ställde upp fyra ekvationer för direktstrålningen, var och en gällande för olika tidpunkter. Instrålning enligt dessa ekvationer och enligt ekvation (4.1) jämförs i figur 4.2.

Instrålningen enligt ekvation (4.1) vid olika latituder framgår av figur 4.3 och vid varierande turbiditet i atmosfären av figur 4.4.

Rapp och Hoffmann (31) redovisar instrålningens variation under dagen för sex diskreta dagar, figur 4.5, i Fort Hood, Texas. Instrålningen enligt ekvation (4.1) för motsvarande dagar och latitud framgår av figur 4.6. Överensstämmelsen är god.

I kapitel 8 genomförs beräkningar för olika solfångare för en vårdag 24 mars (dag nr 87), en sommardag 23 juni (dag 174) och en vinterdag 14 december (dag 348). För dessa tre dagar visas solhöjden resp. direktinstrålningen i figur 4.7 och 4.8 enligt ekvationerna (4.7) resp. (4.1).

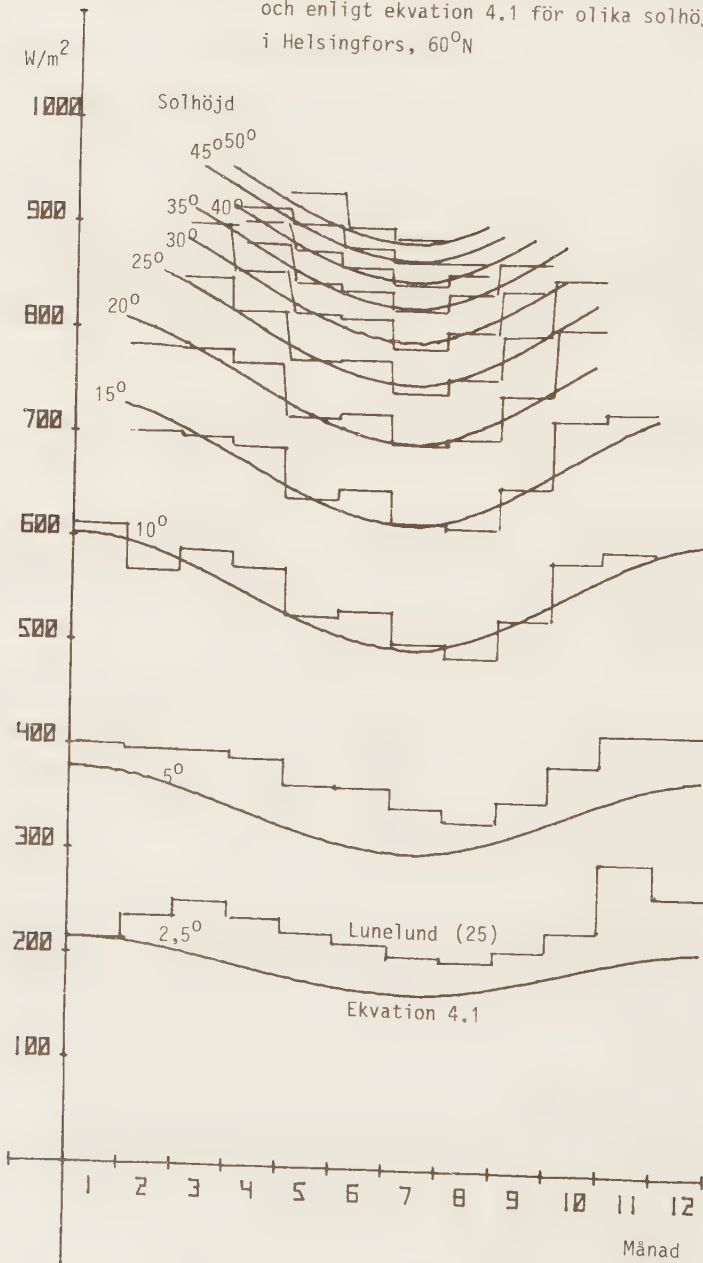
Förutom av direktstrålning träffas solfångarna av diffus och reflekterad strålning. Denna strålning är olika om himlen är klar eller molnig. Vid beräkningarna har genomgående använts den diffusa strålningen under klara dagar. Mot en lutande yta blir denna enligt Pleijel (28)

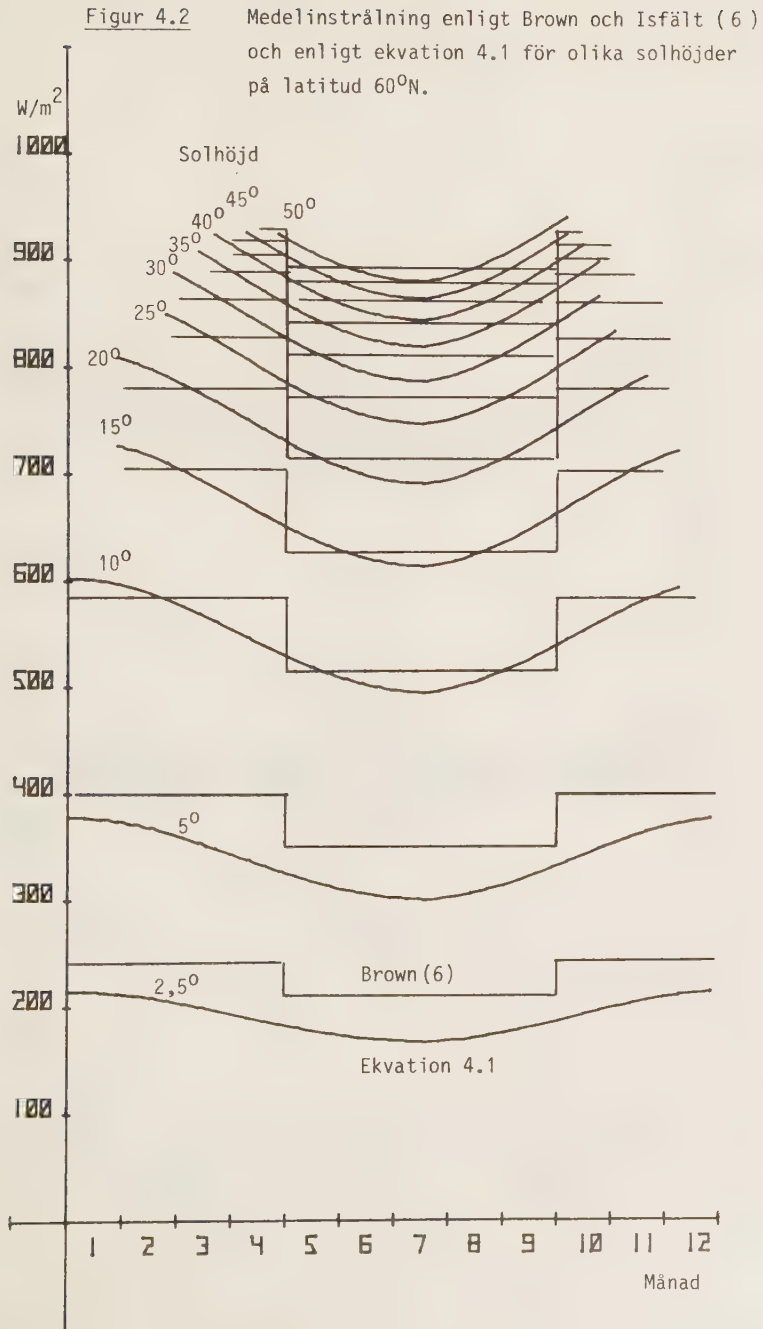
$$I_{dL_K} = 122 \sin h (1 + \cos \gamma)(1 - 0,55 \sin h) \quad (4.13)$$

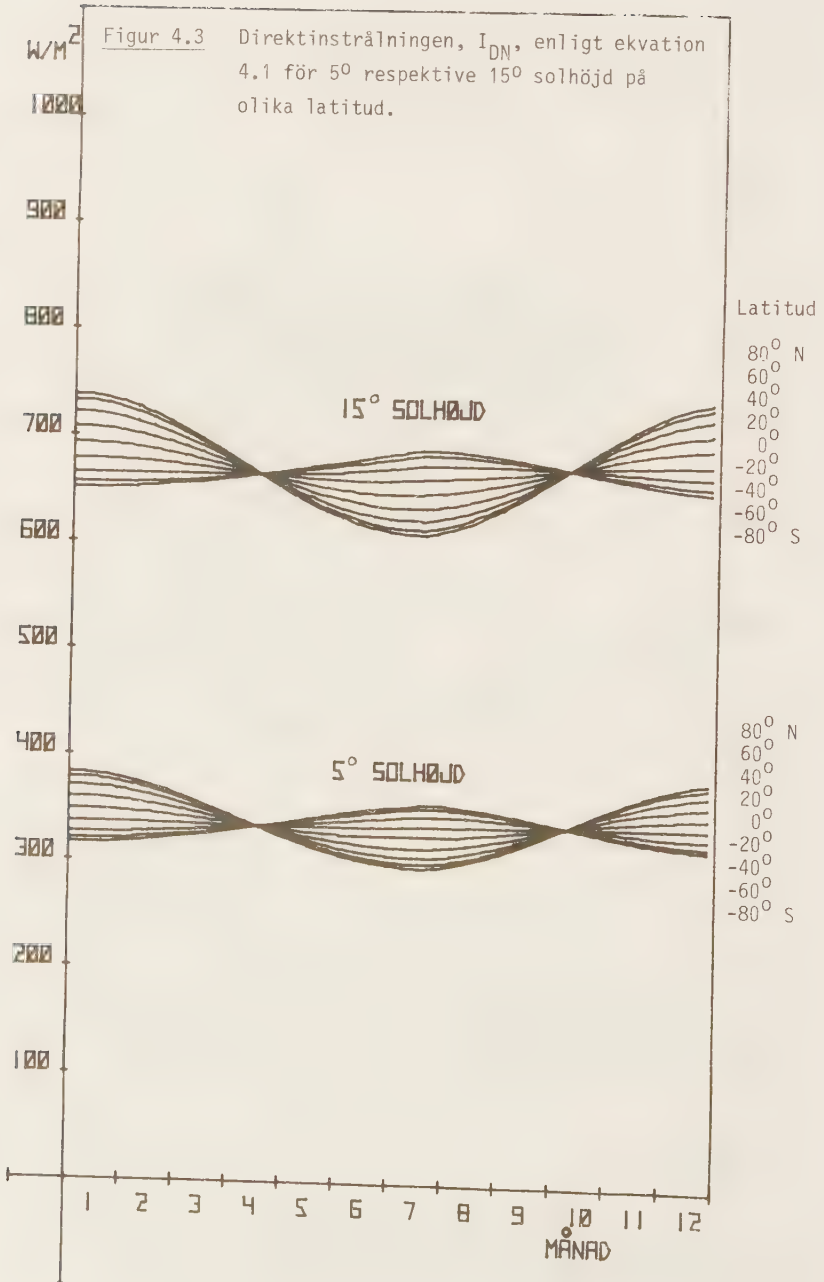
Här härledda ekvationer för solstrålningens intensitet som funktion av tid användes i kapitel 8 vid beräkning av solfångares prestanda.

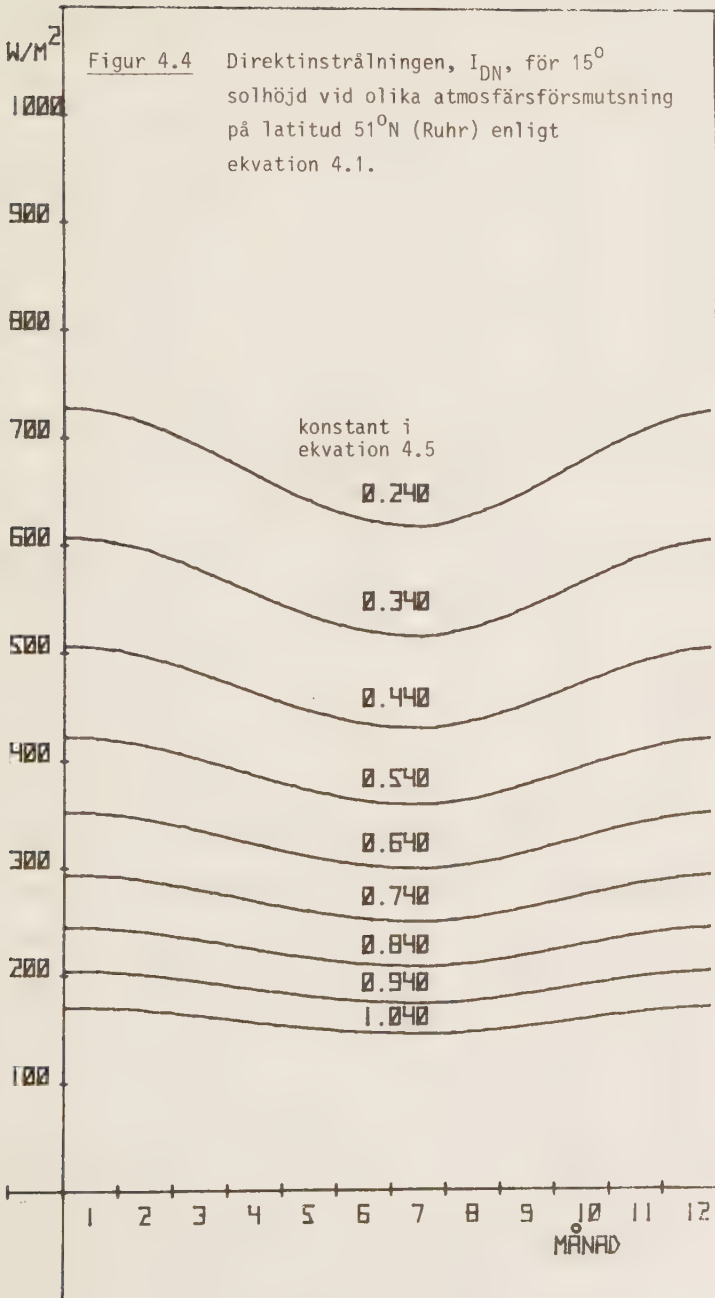
Figur 4.1

Medelinstrålning enligt Lunelund (25)
och enligt ekvation 4.1 för olika solhöjder
i Helsingfors, 60°N

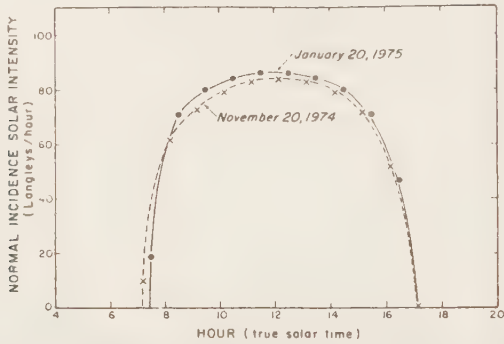




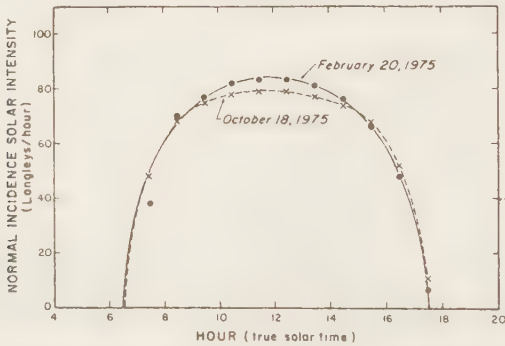




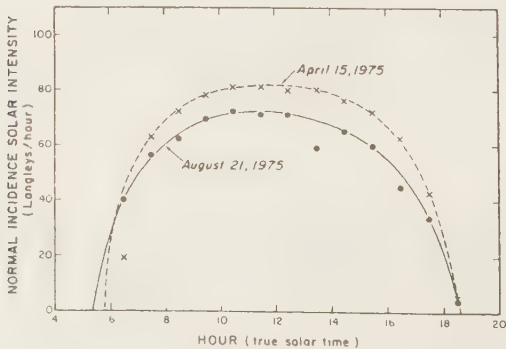
Figur 4.5 Solinstrålning, I_{DN} , enligt Rapp och Hoffman (31) för Fort Hood, Texas, för 6 diskreta dagar.



Variation of normal incidence solar intensity with hour for clear winter days equally spaced about 21 December. The two curves are nearly identical, but the peak in January is slightly higher than the peak in November.



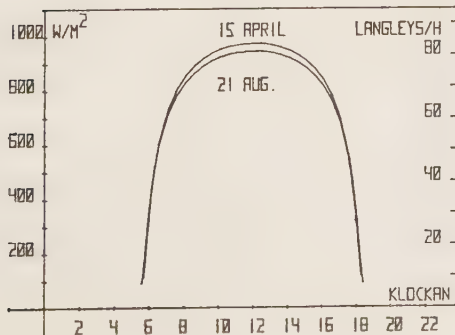
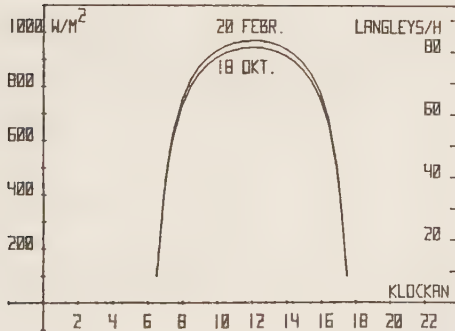
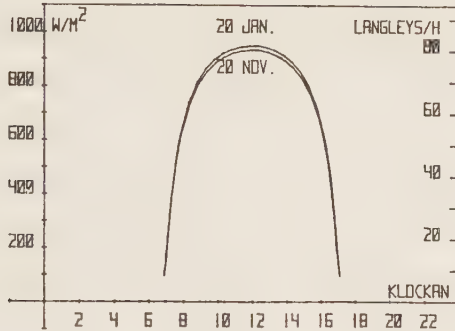
Variation of normal incidence solar intensity with hour for clear days equally spaced about 21 December. Note the higher peak intensity in February than in October.



Variation of normal incidence solar intensity with hour for clear days equally spaced about 21 December. Note the higher peak intensity in April than in August.

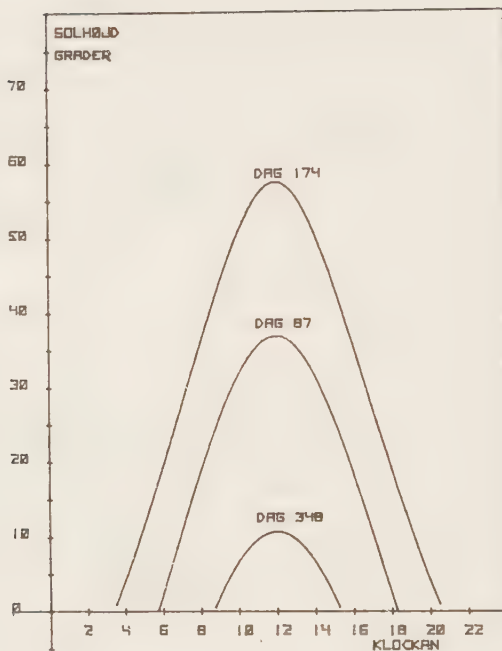
Figur 4.6

Solinstrålning, I_{DN} , enligt ekvation 4.1 för latitud $31^{\circ}04'N$ (Fort Hood, Texas) för 6 olika dagar.



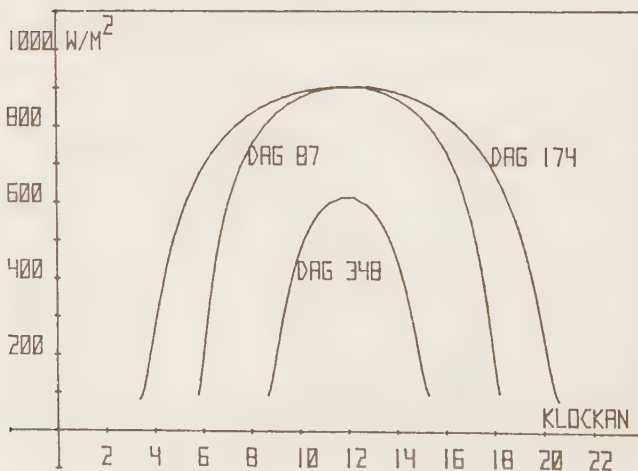
Figur 4.7

Solhöjden under olika dagar
för latitud 56°N .



Figur 4.8

Instrålningen, I_{DN} ,
för olika dagar för
latitud 56°N .



5. UTETEMPERATUR VID KLART RESP. MULET VÄDER

Hur medelvärde av utetemperaturen varierar under dygnet och året på olika platser i Sverige är väl dokumenterat i Klimatdata för Sverige (36). Från denna källa är tabell 5.1 och 5.2 hämtade. Eftersom temperaturen i dessa tabeller är medelvärden, inkluderar de temperaturen för både klara och mulna dagar.

När det gäller solvärmeanläggningar ger solfångarna uttagbar effekt i regel endast vid klart väder. Vid mulet väder bör således solfångarna vara ur drift för att förhindra onödiga värmeförluster. De värmeförluster som man är intresserad av att kunna beräkna, gäller när solfångaren ger effekt, alltså vid klart väder. För att kunna göra dessa beräkningar måste man känna utetemperaturen vid klart väder.

Ovannämnda Klimatdata ger ingen upplysning om hur temperaturen varierar vid klart resp. mulet väder, varför här göres en ansats att beräkna troliga temperaturer med utgångspunkt från kända medelvärden.

5.1 TEMPERATURVARIATIONER UNDER ÅRET

Månadsmedelvärden för temperaturen i Lund enligt tabell 5.1 har ritats upp i figur 5.1 och en kurvanpassning har gjorts.

Följande matematiska samband följer ganska väl månadsmedeltemperaturen:

$$\bar{T}_a(t) = 8 + 9,6 \sin\left[\pi(n_D + A)/B\right] \quad (5.1)$$

vari för

dag nr 1 - 31:	A = 264	B = 197
" " 32 - 200:	A = -116	B = 170
" " 201 - 365:	A = -101	B = 197

$\bar{T}_a$ = dygnsmedeltemperaturen

Utetemperaturen påverkas av instrålningen från resp. utstrålningen till rymden. Detta medför att för klara dagar blir medeltemperaturen lägre, medan amplituden, dvs skillnaden mellan högsta och lägsta medeltemperatur, blir större än för totala medelvärdet för klara + mulna dagar. För mulna dagar blir förhållandet omvänt: medeltemperaturen blir högre medan amplituden blir mindre än för totala medelvärdet för klara + mulna dagar.

Med utgångspunkt från detta resonemang och från det faktum att det är fler mulna än klara dagar under året, vilket medför att de mulna dagarnas medeltemperatur måste ligga närmare den totala medeltemperaturen än de klara dagarna gör, har följande antagits:

för klara dagar (Lund)

medeltemperatur $+7^{\circ}\text{C}$, amplitud 11°C

vilket ger ekvationen

$$\bar{T}_{a_K}(t) = 7 + 11 \sin \left[\pi(\text{dag nr} + A)/B \right] \quad (5.2)$$

för mulna dagar (Lund)

medeltemperatur $+8,5^{\circ}\text{C}$, amplitud $8,9^{\circ}\text{C}$,

vilket ger ekvationen

$$\bar{T}_{a_M}(t) = 8,5 + 8,9 \sin \left[\pi(\text{dag nr} + A)/B \right] \quad (5.3)$$

med A och B som i ekvation (5.1). $\bar{T}_{a_K}(t)$ resp. $\bar{T}_{a_M}(t)$ enligt dessa ekvationer visas grafiskt i figur 5.2.

5.2 TEMPERATURVARIATIONER UNDER DYGNET

Kring dygnsmedeltemperaturen pendlar temperaturen under dygnet. Hur pendlingen sker får man en viss uppfattning om dels genom medeltemperaturen kl 07, 13 och 19 enligt tabell 5.2, dels genom dygnskurvorna för fyra orter i Sverige enligt figur 5.3 (36).

Om pendlingen har samma form även för andra orter som i figur 5.3 kan man utan större fel betrakta temperaturkurvan som en sinuskurva kring dygnsmedeltemperaturen, i varje fall för den ljusa delen av dygnet (vilken är den som är av intresse i det här sammanhanget).

Med utgångspunkt från samma resonemang som gällde för dygnsmedeltemperaturens beroende av klart och mullet väder har för timmen τ från årets början följande ekvationer antagits:

vid klart väder (Lund)

$$T_{a_K} = 7 + 11 \left[\sin \pi(\tau/24 + A)/B \right] + \left\{ 3,5 + 2,5 \sin \left[\pi(\tau/24) - 105 \right] / 182,5 \right\} \sin \left[\pi(\tau - 8)/12 \right] \quad (5.4)$$

vid mullet väder (Lund)

$$T_{a_M} = 8,5 + 8,9 \left[\sin \pi(\tau/24 + A)/B \right] + \left\{ 1,8 + 1,3 \sin \left[\pi(\tau/24) - 105 \right] / 182,5 \right\} \sin \left[\pi(\tau - 8)/12 \right] \quad (5.5)$$

vari för

$\tau = 1 - 744$	$A = 264$	$B = 197$
$\tau = 745 - 4776$	$A = -116$	$B = 170$
$\tau = 4777 - 8760$	$A = -101$	$B = 197$

Temperaturen T_{a_K} resp. T_{a_M} för den 15:e i varje månad enligt dessa ekvationer gällande för Lund visas grafiskt i figur 5.4 resp. 5.5.

Temperaturen vid klart väder som funktion av tid enligt ovanstående ekvationer användes i kapitel 8 vid beräkning av solfångares prestanda.

Tabell 5.1

Normaltemperatur, °C, för månaderna och året, 1931-1960
enligt Klimatdata (36)

Station	Året	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
Kalmar F12	7,0	- 1,7	- 1,9	0,0	5,1	9,8	14,5	17,2	16,3	12,3	7,6	3,6	0,9
Västervik	6,9	- 2,0	- 2,2	0,0	4,8	9,7	14,6	17,4	16,4	12,3	7,6	3,5	0,8
Visby	7,2	- 0,6	- 1,4	0,0	4,3	9,0	13,9	17,1	16,6	12,9	8,3	4,4	1,8
Olands södra udde	7,2	- 0,4	- 0,8	0,3	3,9	8,3	13,0	16,4	16,2	13,1	8,8	5,1	2,4
Ronneby	7,1	- 1,5	- 1,4	0,5	5,1	10,2	14,3	16,9	16,0	12,4	7,8	4,1	1,2
Karlshamn	7,6	- 0,9	- 0,9	1,1	5,4	10,5	14,8	17,3	16,4	12,9	8,4	4,6	1,7
Utklippan	7,4	0,4	- 0,1	0,7	3,4	7,6	12,6	16,1	16,1	13,9	9,2	5,7	3,1
Hagshults flygplats	5,6	- 3,4	- 3,5	-1,0	4,0	9,4	13,4	15,5	14,5	10,8	6,0	2,1	- 0,6
Huskvarna	6,5	- 2,4	- 2,6	-0,2	4,9	10,1	14,5	16,8	15,7	11,6	6,8	3,0	0,3
Jönköping	6,1	- 2,6	- 3,0	-0,7	4,3	9,3	13,8	16,3	15,2	11,4	6,6	2,7	0,0
Borås	6,3	- 2,9	- 3,0	-0,4	4,7	10,5	14,2	16,5	15,4	11,4	6,7	2,7	- 0,1
Nässjö	5,4	- 4,1	- 4,1	-1,2	3,9	9,6	13,7	16,1	14,8	10,7	5,7	1,5	- 1,3
Växjö	6,5	- 2,8	- 2,7	-0,1	5,0	10,5	14,6	16,6	15,6	11,6	6,8	2,8	- 0,1
Malmö flygplats	8,0	- 0,5	- 0,7	1,4	6,0	11,0	15,0	17,2	16,7	13,5	8,9	4,9	2,0
Kullen	7,9	- 0,3	- 0,9	1,0	5,5	10,8	14,8	17,1	16,8	13,8	9,2	5,0	2,2
Kristianstad	7,7	- 0,9	- 0,9	1,2	5,9	11,1	15,2	17,4	16,5	12,9	8,3	4,5	1,6
Ljungbyhed F5	7,1	- 1,5	- 1,5	0,6	5,5	10,7	14,4	16,6	15,8	12,4	7,7	3,9	1,1
Lund	8,0	- 0,7	- 0,8	1,3	6,2	11,3	15,2	17,4	16,8	13,5	8,7	4,8	1,9
Alnarp	7,8	- 0,8	- 1,0	1,2	5,9	11,1	15,0	17,1	16,6	13,3	8,5	4,6	1,8
Ystad	7,8	- 0,2	- 0,6	1,2	5,3	10,1	14,1	16,7	16,4	13,4	9,2	5,3	2,4

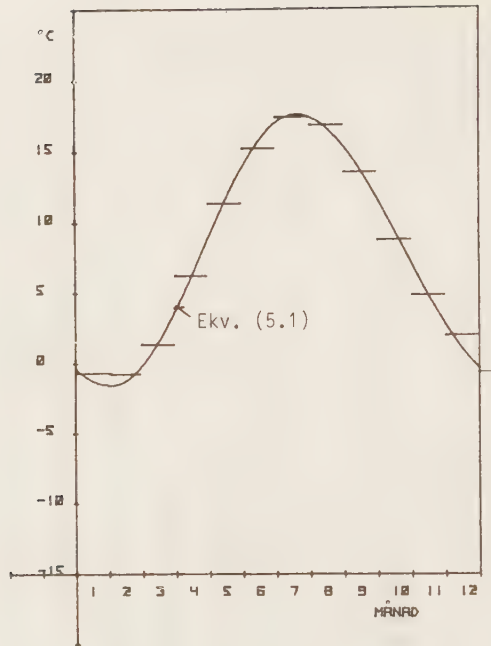
Tabelle 5.2

Medeltemperatur, °C, kl. 07, 13 och 19 samt under dagen kl. 08 - 18, 1931-1960
enligt Klimatdata (36)

Station	Kl	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
Göteborg	07	- 1,6	- 2,5	- 1,1	3,8	9,3	13,5	15,7	14,6	11,0	7,1	3,9	1,6
	13	- 0,5	- 0,1	3,0	8,2	13,9	17,4	19,6	19,0	15,1	10,1	5,2	2,3
	19	- 0,9	- 0,8	2,2	7,2	13,1	16,6	19,0	17,9	14,1	9,0	4,6	1,9
	08-18	- 0,9	- 0,6	2,4	7,5	13,1	16,7	19,0	18,3	14,5	9,0	4,7	2,0
Kalmar F 12	07	- 1,7	- 2,3	- 1,2	3,4	8,4	13,5	16,1	15,3	11,5	7,5	3,8	1,2
	13	- 0,5	- 0,3	1,7	5,9	10,9	15,9	18,8	18,5	15,2	10,2	5,1	2,1
	19	- 1,1	- 1,2	0,7	5,0	10,3	15,2	18,4	17,5	13,9	8,9	4,4	1,1
	08-18	- 0,9	- 0,8	1,1	5,5	10,4	15,4	18,4	18,0	22,0	14,3	4,6	1,8
Västervik	07	- 2,5	- 3,4	- 2,2	2,9	8,8	14,0	16,6	15,0	10,2	6,2	3,1	0,4
	13	- 1,3	- 0,6	2,6	7,7	12,7	17,4	20,1	19,4	15,2	9,6	4,5	1,4
	19	- 2,1	- 1,9	0,5	5,6	10,7	16,0	18,6	17,2	12,4	7,5	3,6	0,8
	08-18	- 1,8	- 1,4	1,5	6,8	11,5	16,5	19,2	18,5	20,4	12,5	3,9	1,0
Visby	07	- 0,9	- 1,9	- 1,1	3,3	8,5	13,5	16,5	15,8	12,0	7,5	4,2	1,6
	13	- 0,2	- 0,3	1,4	5,9	10,9	15,9	18,9	18,5	14,8	9,6	4,9	2,0
	19	- 0,7	- 1,5	- 0,1	4,3	9,8	14,9	17,8	16,9	12,6	8,0	4,3	1,7
	08-18	- 0,5	- 0,9	0,7	5,3	10,2	15,3	18,2	17,9	21,5	13,6	4,6	1,8
Ronneby	07	- 2,3	- 2,9	- 1,6	3,4	9,6	14,2	16,6	14,8	10,2	6,0	3,2	0,4
	13	- 0,1	0,9	4,0	9,0	14,8	18,5	21,3	20,3	16,5	11,0	5,7	2,1
	19	- 1,6	- 1,5	0,4	5,5	11,1	15,7	18,4	16,6	12,2	7,4	3,7	1,0
	08-18	- 1,0	- 0,3	2,4	7,8	12,8	17,0	20,0	19,1	21,2	13,1	4,6	1,4
Karlshamn	07	- 1,4	- 1,8	- 0,1	4,5	10,4	14,8	17,0	16,0	12,0	7,4	4,1	1,4
	13	0,1	0,8	3,2	7,6	12,9	16,9	19,6	18,7	15,4	10,4	5,7	2,6
	19	- 0,8	- 0,7	1,3	6,0	11,7	16,3	18,4	17,2	13,4	8,4	4,6	1,9
	08-18	- 0,5	0,0	2,3	7,0	12,2	16,5	18,9	18,1	22,1	14,1	5,0	2,1
Husvarna	07	- 2,7	- 3,9	- 1,7	2,9	8,7	13,5	15,7	13,6	9,5	5,7	2,6	0,1
	13	- 1,0	- 0,2	3,8	9,1	14,5	19,0	21,6	20,3	15,9	9,9	4,3	1,2
	19	- 2,1	- 2,6	0,5	6,0	11,6	16,0	18,5	16,4	11,5	6,4	2,8	0,2
	08-18	- 1,7	- 1,4	2,3	7,9	12,8	17,3	19,3	18,9	14,1	8,3	3,5	0,7
Jönköping	07	- 3,1	- 4,1	- 2,7	2,9	8,5	13,4	15,6	14,2	9,9	5,5	2,4	- 0,1
	13	- 1,3	- 0,8	2,5	7,6	12,6	17,2	19,5	18,8	14,9	9,5	4,2	1,1
	19	- 2,6	- 2,7	0,1	5,8	11,4	15,9	18,2	16,8	11,8	6,5	2,7	0,1
	08-18	- 2,1	- 1,8	1,3	6,7	11,7	16,3	18,6	17,9	19,8	11,6	3,4	0,6
Borås	07	- 3,3	- 4,3	- 2,9	2,5	8,7	13,3	15,3	13,8	9,1	5,3	2,2	- 0,5
	13	- 1,9	- 0,8	3,1	8,4	14,4	18,0	20,1	19,0	14,9	9,4	3,8	0,5
	19	- 2,9	- 2,6	0,4	6,3	12,9	16,5	18,8	16,7	11,5	6,6	2,7	- 0,2
	08-18	- 2,5	- 1,8	1,7	7,4	13,2	16,2	19,1	18,0	13,4	8,1	3,1	0,1
Nässjö	07	- 5,3	- 5,5	- 4,1	1,4	7,3	12,3	14,2	12,6	8,2	4,3	0,9	- 1,5
	13	- 3,3	- 2,1	1,7	7,4	13,4	17,7	19,8	18,6	13,8	8,0	2,5	- 0,6
	19	- 4,8	- 4,0	- 0,2	5,8	11,8	16,2	18,2	16,2	11,3	5,6	1,3	- 1,4
	08-18	- 4,2	- 3,1	0,6	6,4	12,2	16,6	18,6	17,5	17,8	10,0	1,8	- 1,0
Växjö	07	- 3,3	- 4,3	- 3,1	2,1	8,4	13,0	14,9	13,3	9,3	5,2	2,3	- 0,5
	13	- 1,7	- 0,8	2,7	8,3	14,3	18,3	20,0	19,1	15,0	9,3	4,0	0,7
	19	- 2,7	- 2,4	0,6	6,7	12,8	16,9	18,7	17,0	12,1	6,7	2,7	- 0,1
	08-18	- 2,3	- 1,7	1,5	7,3	13,1	17,2	19,0	18,1	19,6	11,3	3,2	0,2
Malmö flygplats	07	- 0,8	- 1,4	- 0,1	4,6	10,0	14,4	16,4	15,6	12,1	7,5	4,6	2,0
	13	0,7	0,9	3,7	9,1	14,6	18,1	19,9	19,5	16,2	11,0	6,2	3,0
	19	± 0,0	- 0,1	1,9	7,1	12,4	16,5	18,5	17,8	14,0	9,1	5,2	2,4
	08-18	0,2	0,3	2,8	8,2	13,3	17,1	19,0	19,0	23,0	15,0	5,6	2,6
Kristianstad	07	- 1,5	- 2,2	- 0,9	4,0	9,7	14,0	15,9	14,7	10,6	6,4	3,7	1,1
	13	- 0,1	0,5	3,5	9,2	14,7	18,5	20,4	18,8	16,1	10,8	5,6	2,4
	19	- 0,8	- 0,6	1,4	6,6	12,3	17,0	18,7	17,2	13,1	8,3	4,5	1,5
	08-18	- 0,6	0,2	2,4	8,2	13,2	17,5	19,3	18,1	21,5	13,6	4,8	1,8
Älmarp	07	- 1,1	- 1,8	- 0,4	4,4	10,6	15,5	16,9	15,3	11,6	7,2	4,1	1,6
	13	0,4	1,1	4,8	10,5	16,5	20,7	22,0	21,6	17,6	11,5	6,1	2,7
	19	- 0,5	- 0,6	1,5	6,8	12,5	16,6	18,5	17,6	13,7	9,2	4,7	1,9
	08-18	- 0,2	± 0,0	3,3	9,2	14,3	18,5	20,0	20,3	16,0	10,3	5,3	2,2

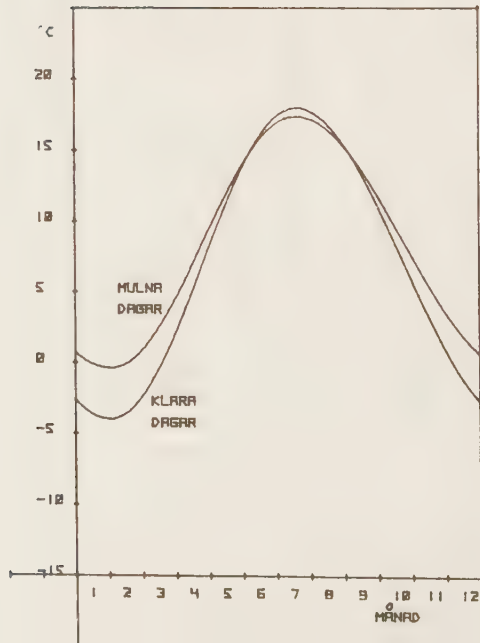
Figur 5.1

Dygnsmedeltemperatur i Lund
enligt Klimatdata (36)
och enligt ekvation 5.1.

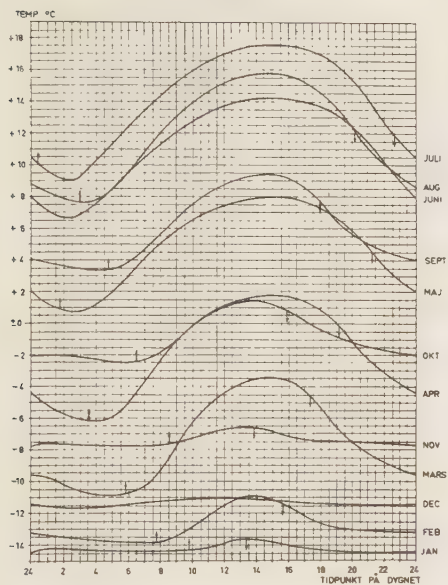


Figur 5.2

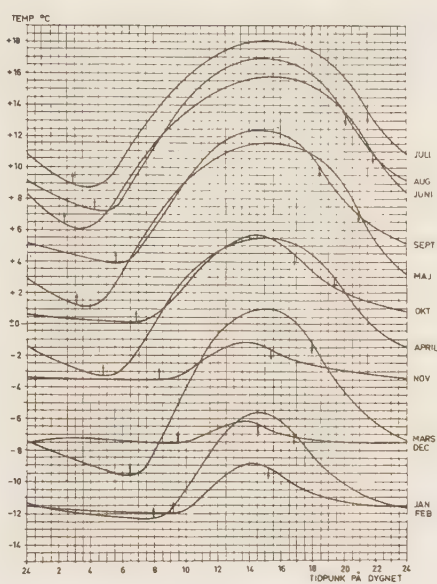
Dygnsmedeltemperatur i Lund
enligt ekvationerna 5.2 och
5.3 för klara respektive
mulna dagar.



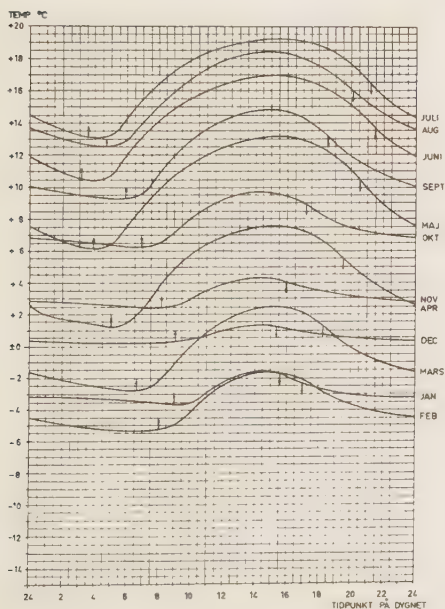
Temperaturens genomsnittliga dygnsförlopp under olika månader, 1951-1960 enligt Klimatdata (36)



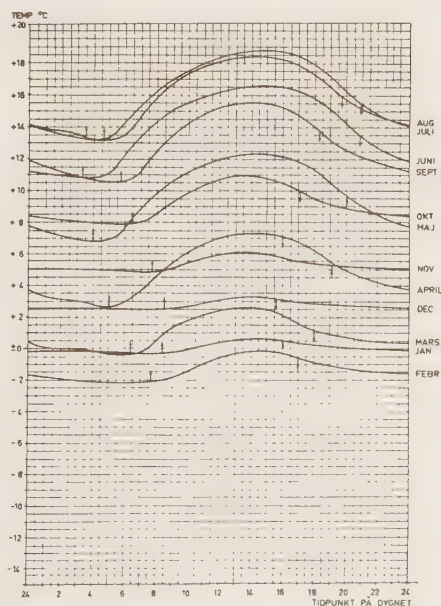
Pajala



Sveg



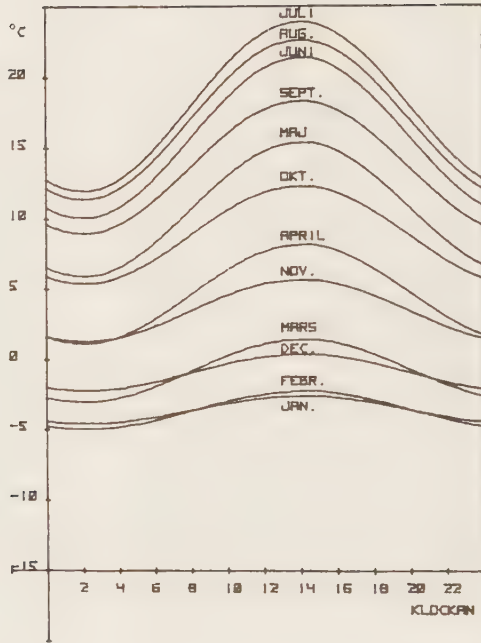
Strömstad



Ystad

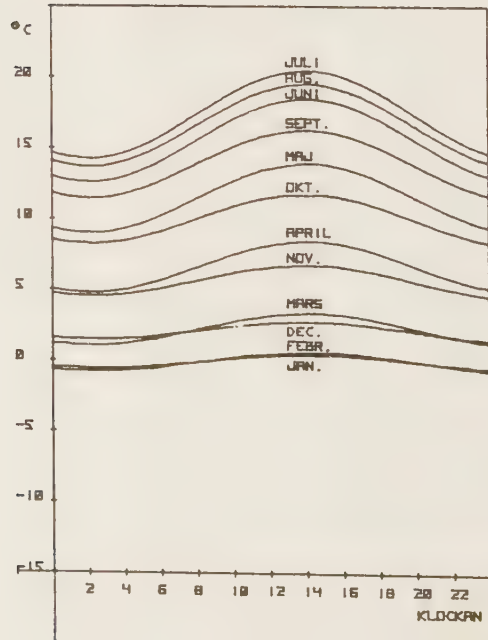
Figur 5.4

Temperatures dygnsvariation
i Lund klara dagar den 15:e
i respektive månad enligt
ekvation 5.4.



Figur 5.5

Temperatures dygnsvariation
i Lund mulna dagar den 15:e
i respektive månad enligt
ekvation 5.5.



6. SOL- OCH MOLNPERIODER I LUND

Utgångshypotesen för denna avhandling är, att det ej är oväsentligt för en solfångares effektivitet hur en bestämd mängd solenergi tillförs solfångaren, alltså om det sker i ett fåtal långa perioder eller i många småperioder. Eftersom tillgängliga klimatdata ej ger någon upplysning om hur solmängden under dagen fördelas på perioder, har jag mätt solperiodernas resp. molnperiodernas längd och antal i Lund. Mätutrustningen och mätningarna för tiden augusti 1979 till februari 1981 finns redovisade i en institutionsrapport (30). Från denna rapport kan sammanfattas:

Sol- och molnperioderna följer ett mycket bestämt fördelningsmönster när det gäller periodernas frekvens som funktion av periodlängden. Ekvationen för regressionslinjen genom uppmätt normerad frekvens v blir för solperioder med längden $\lambda > 1,0$ minut och för molnperioder med längden $\lambda > 0,25$ minut

$$\frac{v(\lambda)}{\lambda} = k\lambda^{-n} \quad (6.1)$$

och för solperioder ≤ 1 minut och molnperioder $\leq 0,25$ minut

$$\frac{v(\lambda)}{\lambda} = \text{konstant} \cdot \lambda \quad (6.2)$$

För solperioderna blir konstanten = k och för molnperioderna blir konstanten = $0,25^{1-n}k$.

Efter derivering och integrering erhålles för solperioder mellan 0 och godtycklig längd λ_s med $(1,0 < \lambda_s \leq \lambda_D)$

$$\int_0^{\lambda_s} dv = \int_0^1 k\lambda^{-n} d\lambda + \int_1^{\lambda_s} k\lambda^{-n} d\lambda = k + k\frac{\lambda_s^{1-n}-1}{1-n} \quad (6.3)$$

och för molnperioder mellan 0 och λ_m med ($0,25 < \lambda_m \leq \lambda_D$)

$$\int_0^{\lambda_m} dv = \int_0^{0,25} k \lambda^{-n} d\lambda + \int_{0,25}^{\lambda_m} k \lambda^{-n} d\lambda = 0,25^{1-n} k + k \left[\frac{\lambda_m^{1-n} - 0,25^{1-n}}{1-n} \right] \quad (6.4)$$

Dagens längd, λ_D , beräknas ur latitud och deklination (10),

$$\lambda_D = \frac{2}{15} \arccos (-\tan \phi \tan \delta) \quad (6.5)$$

Sammanlagda tiden $\tau(\lambda)$ för en viss periodlängd λ under en tidsrymd är frekvensen v för periodlängden under denna tidsrymd gånger periodlängden λ , dvs

$$\tau(\lambda) = v(\lambda) \cdot \lambda \quad (6.6)$$

Integrerat över en dag ger detta soltid τ_s , resp. molntid τ_m för dagen.

För perioder mellan 0 och godtycklig längd λ erhålles analogt med ekvation (6.3) resp. (6.4) för solperioder:

$$\int_0^{\lambda_s} d\tau_s = \int_0^1 k \lambda^{-n} d\lambda + \int_1^{\lambda_s} k \lambda^{-n} d\lambda = \frac{k}{2} + k \left[\frac{\lambda_s^{2-n} - 1}{2-n} \right] \quad (6.7)$$

för molnperioder

$$\int_0^{\lambda_m} d\tau_m = \frac{0,25^{2-n} k}{2} + k \left[\frac{\lambda_m^{2-n} - 0,25^{2-n}}{2-n} \right] \quad (6.8)$$

Tiden för perioder mellan 0 och λ enligt ekvation (6.7) dividerat med totala soltiden under dagen ger andelen sol inom intervallet $0 - \lambda$. Motsvarande gäller för molntiden.

För den tid mina mätningar pågått, har k och n i ovanstående ekvationer beräknats och finns sammanställda i (30). För solperioderna

har n varierat mellan 1,4 och 2,2 och k mellan 4,3 och 88. Lågt n -värde gäller för dagar då soltiden varit uppdelad på ett fåtal perioder och ett högt n -värde gäller då soltiden varit uppdelad på många småperioder.

k och n varierar inte oberoende av varandra, utan är förutom av varandra en funktion av dagens längd, λ_D , och sannolikheten för sol, σ_S , under dagen.

Soltiden τ_S under en dag är

$$\tau_S = \lambda_D \sigma_S \quad (6.9)$$

men är även = ekvation (6.7). Därav följer att

$$k \frac{1}{2} + \left[\frac{\lambda_D^{2-n} - 1}{2-n} \right] = \lambda_D \sigma_S \quad (6.10)$$

och

$$k = \frac{\lambda_D \sigma_S}{\frac{1}{2} + \frac{\lambda_D^{2-n} - 1}{2-n}} \quad (6.11)$$

För specialfallet $n = 2$ gäller

$$k = \frac{\lambda_D \sigma_S}{\frac{1}{2} + \ln \lambda_D} \quad (6.12)$$

För $\sigma_S = 0,5$ visas ekvation (6.11) och (6.12) grafiskt i figur 6.1.

För molnperioderna har under mätningarna n varierat mellan 1,2 och 1,8 och k mellan 1,5 och 26.

Om sannolikheten för moln är σ_m gäller för molnperioderna

$$\tau_m = \lambda_D \sigma_m = \lambda_D (1 - \sigma_S) \quad (6.13)$$

och

$$k \left[\frac{0,25^{2-n}}{2} + \frac{\lambda_D^{2-n} - 0,25^{2-n}}{2-n} \right] = \lambda_D^{\sigma_m} \quad (6.14)$$

$$k = \frac{\lambda_D^{\sigma_m}}{\frac{0,25^{2-n}}{2} + \frac{\lambda_D^{2-n} - 0,25^{2-n}}{2-n}} \quad (6.15)$$

För $\sigma_m = 0,5$ visas ekvation (6.15) grafiskt i figur 6.2. Det skall anmärkas att de angivna värdena på k och n för sol- resp. moln-frekvenser är medelvärden och gäller för dagar med sol. Helmulna dagar är således frånräknade.

För dag nr 87 och 174, vilka dagar använts vid beräkningarna i avsnitt 8, visas i figur 6.3 några alternativa frekvensvariationer för solperioderna, alla givande 50% sol under dagen, och vilka frekvenser och solandel dessa ekvationer föranleda. Eftersom solfångare i allmänhet har en tidskonstant på ca 30 minuter då de ej ger uttagbar effekt, och en tidskonstant på endast ett par minuter när de ger uttagbar effekt, är det intressant att se hur stor andel av soltiden som ligger i korta perioder.

De enskilda periodernas längd enligt trendekvationerna kan beräknas. För solperioderna kan ekvation (6.3) skrivas

$$\gamma = k \left(1 + \frac{\lambda^{1-n} - 1}{1-n} \right) \quad (6.16)$$

Om frekvenser för perioder $> 1,0$ min tecknas F och k enligt tidigare är frekvensen för perioder $\leq 1,0$ min, kan ekvation (6.16) skrivas

$$\frac{k + F}{k} = 1 + \frac{\lambda^{1-n} - 1}{1-n} \quad (6.17)$$

vilket ger

$$\frac{F}{k} = \frac{\lambda^{1-n} - 1}{1-n} \quad (6.18)$$

$$\frac{F(1-n)}{k} + 1 = \lambda^{1-n} \quad (6.19)$$

$$\log \left[\frac{F(1-n)}{k} + 1 \right] = (1-n) \log \lambda \quad (6.20)$$

$$\frac{\log \left[\frac{F(1-n)}{k} \right]}{1-n} = \log \lambda \quad (6.21)$$

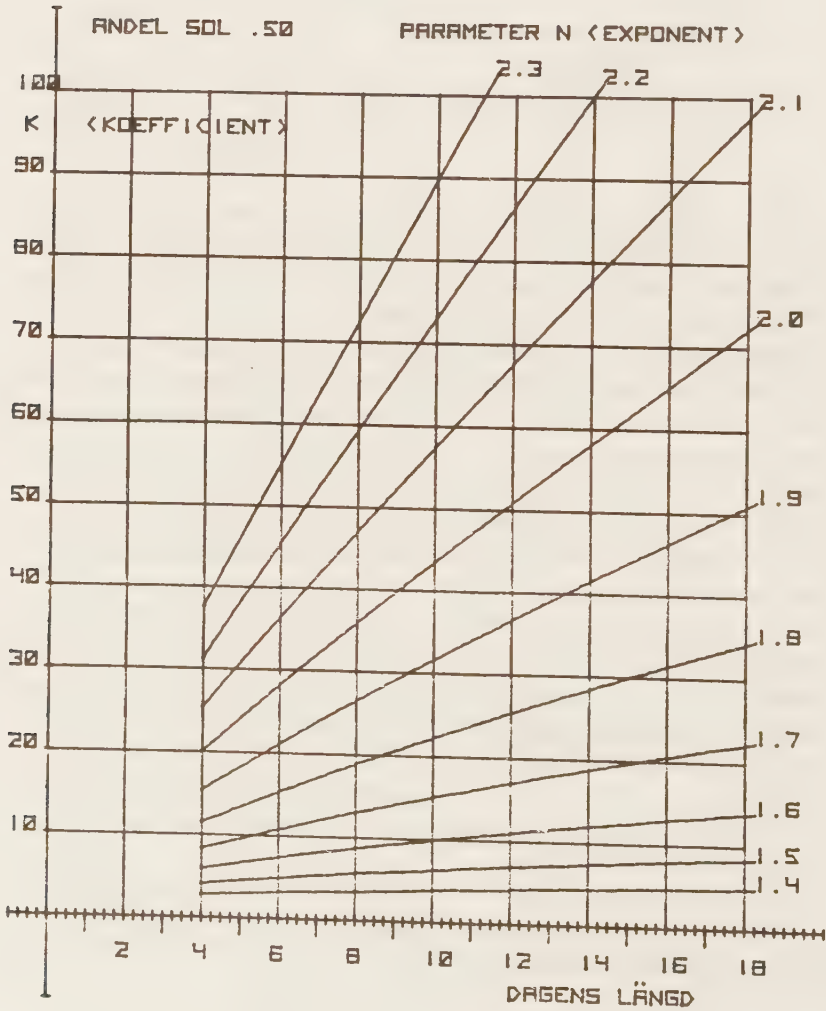
$$\lambda = 10^{\frac{\log \left[\frac{F(1-n)}{k} \right] + 1}{1-n}} \quad (6.22)$$

Genom att låta F successivt växa med 1 tills λ = dagens längd erhålles intervallgränserna. De erhållna intervallgränserna, λ , sättes in i ekvation (6.7), varvid soltiden för dessa gränser erhålles. Skillnaden mellan soltiderna för två närliggande gränser = längden för ifrågakavande solperiod. Beräknas skillnaden mellan alla närliggande gränser erhålles längden på alla solperioder som är längre än 1,0 minut under ifrågakavande dag. Sådan beräkning har skett för exemplen i figur 6.3 - 6.8 och redovisas i tabell 6.1 och 6.2. Vid 50% sol kan man således förvänta sig att solperioderna följer någon av de angivna fördelningsekvationerna (eller någon mellanliggande). Vilken det än blir är det endast den längsta solperioden som har sådan varaktighet, att dagens solfångare hinner utnyttja dess energi. Detta innebär, att man utan att göra andra beräkningar över transienternas inverkan, kan dra slutsatsen att solfångarna tillgodogör sig endast mellan ca 40 till 80% av dagens instrålning. Detta innebär en förlust på omväxlande 60 till 20%, som nuvarande beräkningssätt ej tar hänsyn till.

För molnperioderna sker beräkningarna på motsvarande sätt som för solperioderna.

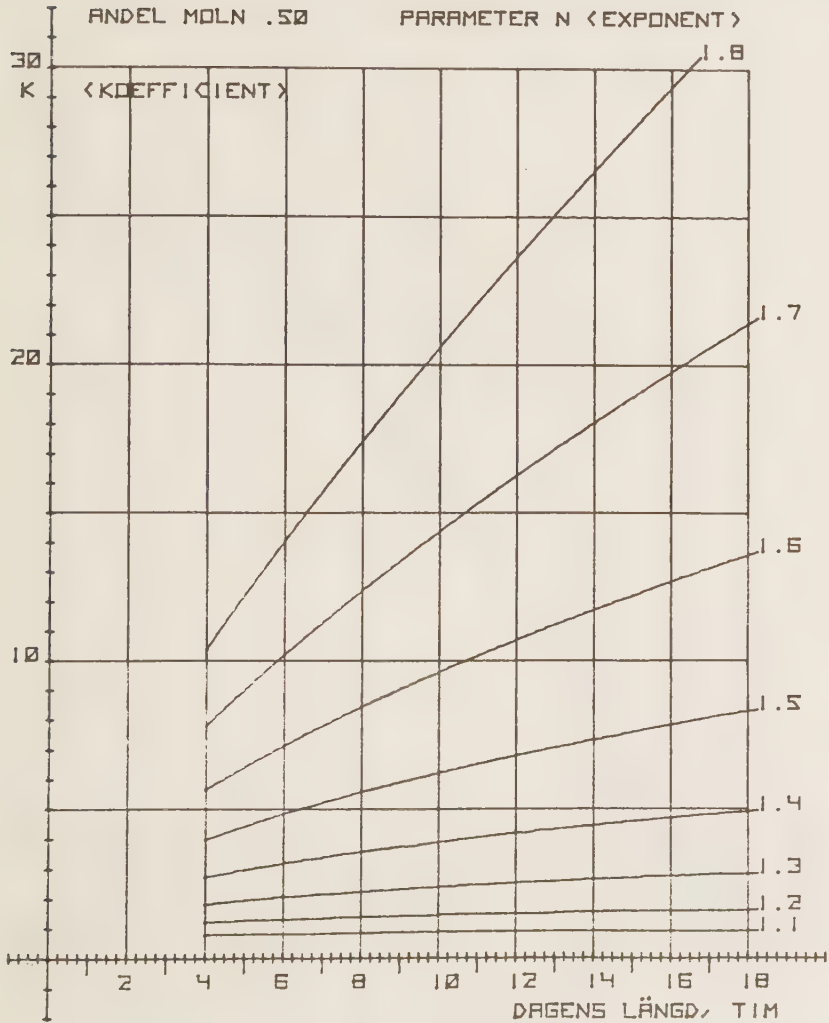
Sol- och molnperioder beräknade enligt ovan används i kapitel 8 vid beräkning av solfångares prestanda.

Figur 6.1 Sammanhörande värden på koefficienten k och exponenten n i ekvation (6.1) till (6.22) som funktion av dagens längd och vid 50% solandel.



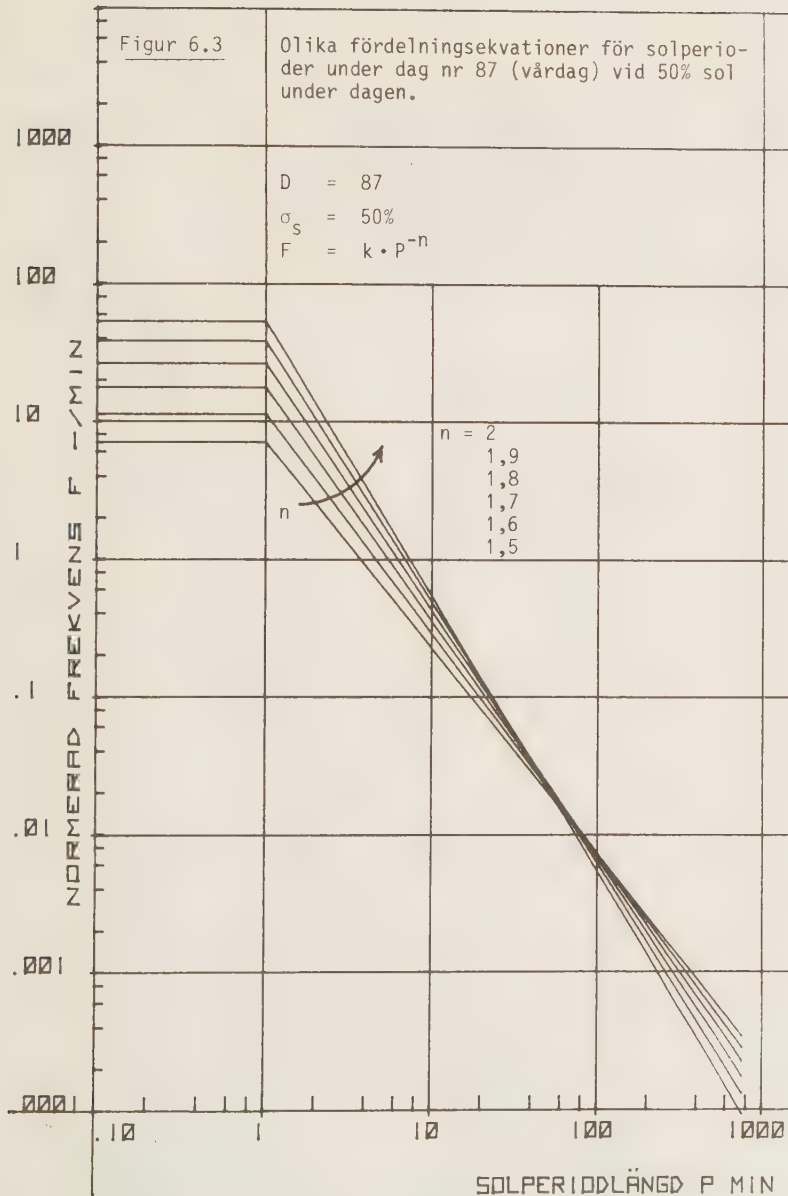
Figur 6.2

Sammanhörande värden på koefficienten k och exponenten n i ekvation (6.1) till (6.22) som funktion av dagens längd och vid 50% molnandel.



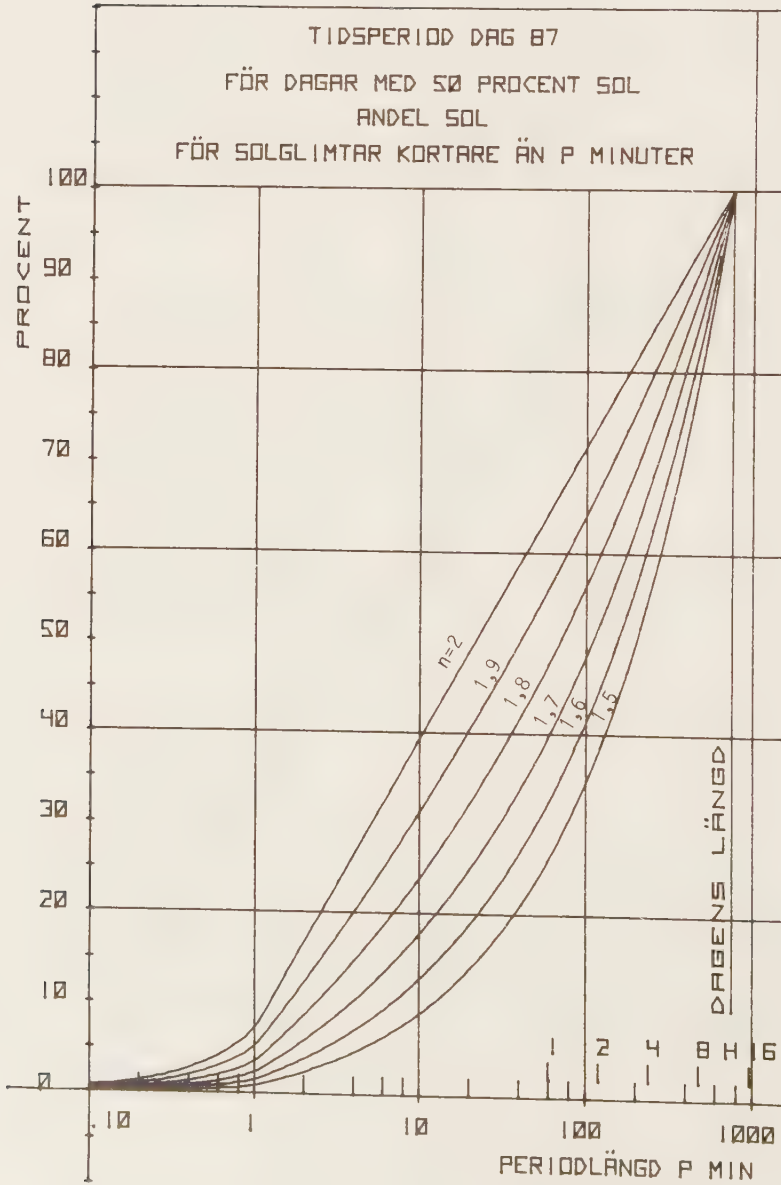
Tabell 6.1 Solperioder under dag nr 87 vid sol 50% av dagens längd vid olika fördelnings-
ekvation (enligt figur 6.3). Perioderna ordnade från kortaste till längsta
solperiod. Tid i minuter.

Antal per. < 1,0 min (medellängd 0,5 min)	FÖRDELNINGSEKVATION					
	$v = 52,784\lambda^{-2}$	$v = 38,007\lambda^{-1,9}$	$v = 26,287\lambda^{-1,8}$	$v = 17,508\lambda^{-1,7}$	$v = 11,273\lambda^{-1,6}$	$v = 7,048\lambda^{-1,5}$
	53 st	38 st	26 st	18 st	11 st	7 st
1.010	1.013	1.019	1.030	1.047	1.076	
1.022	1.041	1.060	1.093	1.149	1.254	
1.053	1.070	1.104	1.163	1.270	1.430	
1.071	1.101	1.151	1.241	1.411	1.774	
1.093	1.133	1.202	1.328	1.520	2.164	
1.116	1.168	1.258	1.426	1.787	2.698	
1.140	1.204	1.317	1.538	2.032	3.459	
1.166	1.243	1.383	1.665	2.341	4.593	
1.192	1.284	1.454	1.811	2.733	6.396	
1.220	1.327	1.532	1.980	3.240	9.519	
1.248	1.374	1.618	2.178	3.903	15.668	
1.279	1.424	1.714	2.412	4.864	26.617	
1.310	1.477	1.820	2.692	6.228	291.738	
1.344	1.534	1.938	3.033	8.328		
1.379	1.596	2.071	3.455	11.058		
1.416	1.662	2.221	3.986	15.585		
1.455	1.734	2.382	4.673	24.662		
1.496	1.813	2.550	5.590	263.290		
1.540	1.898	2.815	6.862			
1.586	1.991	3.083	8.719			
1.635	2.093	3.398	11.633			
1.687	2.205	3.776	16.719			
1.743	2.330	4.238	27.300			
1.803	2.468	4.812	253.679			
1.866	2.624	5.544				
1.935	2.799	6.505				
2.008	2.997	7.813				
2.088	3.224	9.686				
2.174	3.486	12.568				
2.267	3.792	17.483				
2.369	4.154	27.494				
2.480	4.587	224.753				
2.603	5.114					
2.738	5.770					
2.888	6.608					
3.055	7.712					
3.243	9.228					
3.455	11.436					
3.697	14.929					
3.975	21.248					
4.299	36.305					
4.681	174.059					
5.137						
5.641						
6.180						
7.052						
8.418						
10.020						
12.370						
15.090						
23.490						
170.767						
Summa perioder	105 st	80 st	58 st	42 st	29 st	20 st
Andel sol i längsta perioden	45,4%	46,3%	59,8%	67,5%	70,0%	77,6%



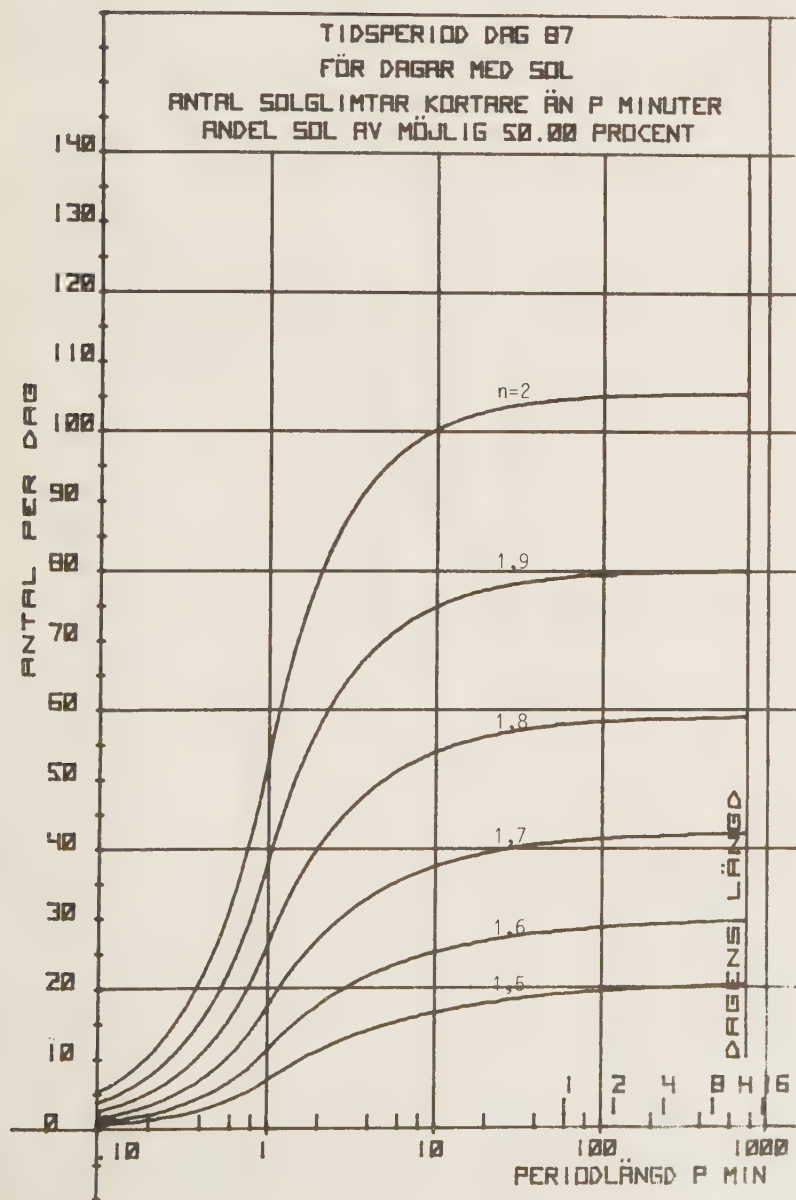
Figur 6.4

Solandel vid solfördelningsekvationer
enligt figur 6.3



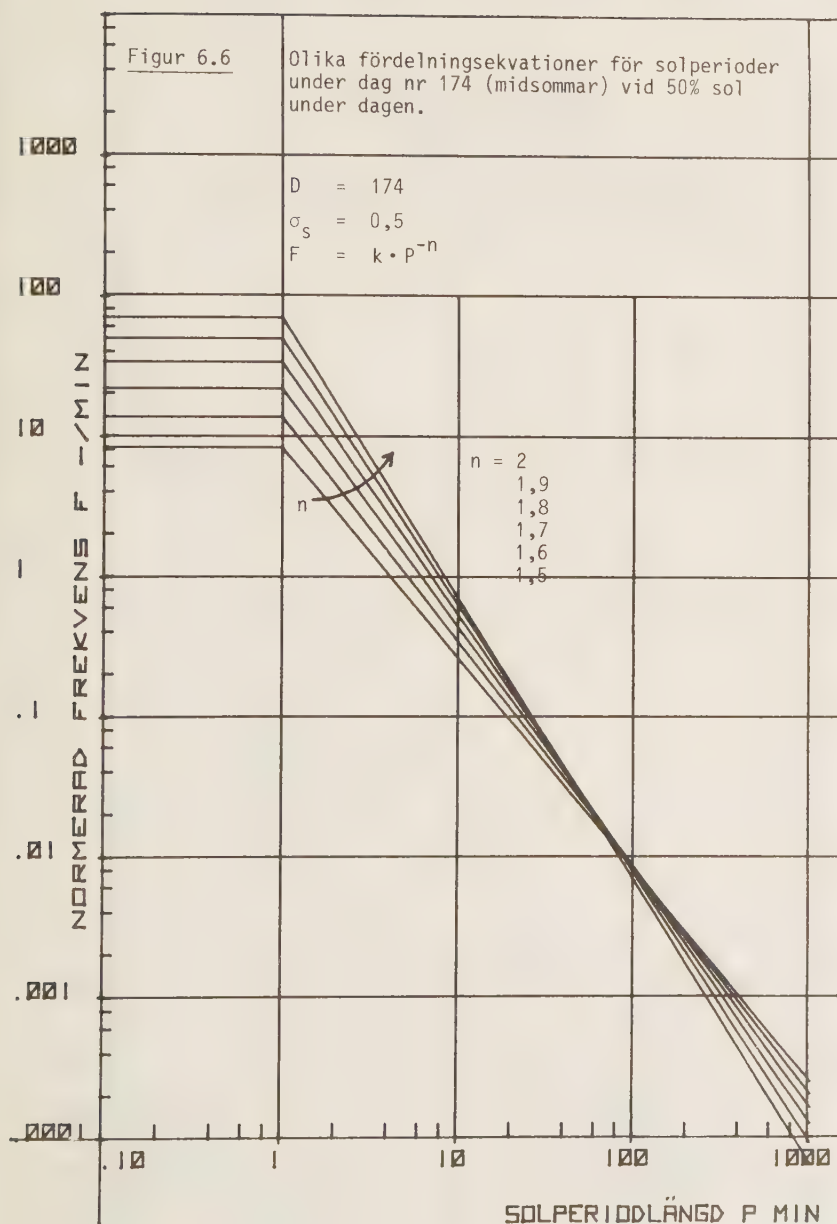
Figur 6.5

Antal solglimtar vid solfördelningsekvationer enligt figur 6.3



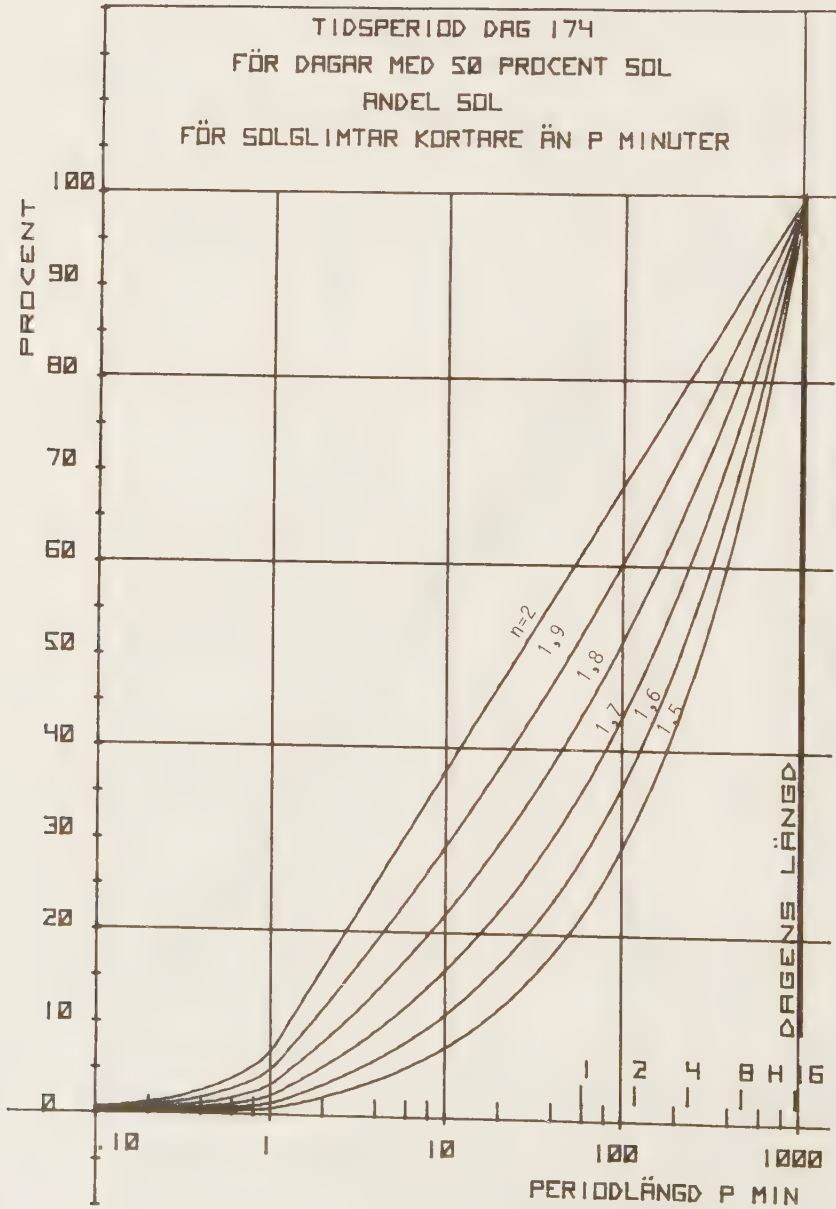
Tabell 6.2 Solperioder under dag nr 174 vid sol 50% av dagens längd vid olika fördelnings-
ekvation (enligt figur 6.6). Perioderna ordnade från kortaste till längsta sol-
period. Tid i minuter.

Antal per. < 1,0 min. (medellängd 0,5 min.)	FÖRDELNINGSEKVATION					
	$v = 69,564\lambda^{-2}$	$v = 49,204\lambda^{-1,9}$	$v = 33,306\lambda^{-1,8}$	$v = 21,642\lambda^{-1,7}$	$v = 13,561\lambda^{-1,6}$	$v = 8,237\lambda^{-1,5}$
	70 st	49 st	33 st	22 st	14 st	8 st
1.010	1.010	1.015	1.004	1.008	1.005	1.005
1.022	1.031	1.047	1.034	1.030	1.027	1.027
1.037	1.053	1.081	1.068	1.062	1.058	1.058
1.053	1.072	1.116	1.107	1.100	1.094	1.094
1.069	1.100	1.154	1.152	1.144	1.138	1.138
1.086	1.125	1.184	1.187	1.178	1.172	1.172
1.100	1.151	1.237	1.240	1.230	1.224	1.224
1.121	1.176	1.252	1.254	1.244	1.238	1.238
1.139	1.200	1.281	1.283	1.272	1.266	1.266
1.158	1.228	1.310	1.312	1.300	1.294	1.294
1.178	1.256	1.340	1.342	1.330	1.324	1.324
1.198	1.284	1.370	1.372	1.360	1.354	1.354
1.219	1.312	1.400	1.402	1.390	1.384	1.384
1.241	1.340	1.430	1.432	1.420	1.414	1.414
1.263	1.368	1.460	1.462	1.450	1.444	1.444
1.287	1.396	1.490	1.492	1.480	1.474	1.474
1.311	1.424	1.520	1.522	1.510	1.504	1.504
1.336	1.451	1.550	1.552	1.540	1.534	1.534
1.363	1.479	1.580	1.582	1.570	1.564	1.564
1.389	1.506	1.610	1.612	1.600	1.594	1.594
1.418	1.534	1.640	1.642	1.630	1.624	1.624
1.448	1.562	1.670	1.672	1.660	1.654	1.654
1.477	1.590	1.700	1.702	1.690	1.684	1.684
1.510	1.618	1.730	1.732	1.720	1.714	1.714
1.544	1.646	1.760	1.762	1.750	1.744	1.744
1.579	1.674	1.790	1.792	1.780	1.774	1.774
1.615	1.702	1.820	1.822	1.810	1.804	1.804
1.654	1.730	1.850	1.852	1.840	1.834	1.834
1.695	1.758	1.880	1.882	1.870	1.864	1.864
1.736	1.786	1.910	1.912	1.900	1.894	1.894
1.781	1.814	1.940	1.942	1.930	1.924	1.924
1.827	1.842	1.970	1.972	1.960	1.954	1.954
1.875	1.870	2.000	2.002	1.990	1.984	1.984
1.925	1.898	2.030	2.032	2.020	2.014	2.014
1.974	1.926	2.060	2.062	2.050	2.044	2.044
2.024	1.954	2.090	2.092	2.080	2.074	2.074
2.074	1.982	2.120	2.122	2.110	2.104	2.104
2.124	2.010	2.150	2.152	2.140	2.134	2.134
2.174	2.038	2.180	2.182	2.170	2.164	2.164
2.224	2.066	2.210	2.212	2.200	2.194	2.194
2.274	2.094	2.240	2.242	2.230	2.224	2.224
2.324	2.122	2.270	2.272	2.260	2.254	2.254
2.374	2.150	2.300	2.302	2.290	2.284	2.284
2.424	2.178	2.330	2.332	2.320	2.314	2.314
2.474	2.206	2.360	2.362	2.350	2.344	2.344
2.524	2.234	2.390	2.392	2.380	2.374	2.374
2.574	2.262	2.420	2.422	2.410	2.404	2.404
2.624	2.290	2.450	2.452	2.440	2.434	2.434
2.674	2.318	2.480	2.482	2.470	2.464	2.464
2.724	2.346	2.510	2.512	2.500	2.494	2.494
2.774	2.374	2.540	2.542	2.530	2.524	2.524
2.824	2.402	2.570	2.572	2.560	2.554	2.554
2.874	2.430	2.600	2.602	2.590	2.584	2.584
2.924	2.458	2.630	2.632	2.620	2.614	2.614
2.974	2.486	2.660	2.662	2.650	2.644	2.644
3.024	2.514	2.690	2.692	2.680	2.674	2.674
3.074	2.542	2.720	2.722	2.710	2.704	2.704
3.124	2.570	2.750	2.752	2.740	2.734	2.734
3.174	2.598	2.780	2.782	2.770	2.764	2.764
3.224	2.626	2.810	2.812	2.800	2.794	2.794
3.274	2.654	2.840	2.842	2.830	2.824	2.824
3.324	2.682	2.870	2.872	2.860	2.854	2.854
3.374	2.710	2.900	2.902	2.890	2.884	2.884
3.424	2.738	2.930	2.932	2.920	2.914	2.914
3.474	2.766	2.960	2.962	2.950	2.944	2.944
3.524	2.794	2.990	2.992	2.980	2.974	2.974
3.574	2.822	3.020	3.022	3.010	3.004	3.004
3.624	2.850	3.050	3.052	3.040	3.034	3.034
3.674	2.878	3.080	3.082	3.070	3.064	3.064
3.724	2.906	3.110	3.112	3.100	3.094	3.094
3.774	2.934	3.140	3.142	3.130	3.124	3.124
3.824	2.962	3.170	3.172	3.160	3.154	3.154
3.874	2.990	3.200	3.202	3.190	3.184	3.184
3.924	3.018	3.230	3.232	3.220	3.214	3.214
3.974	3.046	3.260	3.262	3.250	3.244	3.244
4.024	3.074	3.290	3.292	3.280	3.274	3.274
4.074	3.102	3.320	3.322	3.310	3.304	3.304
4.124	3.130	3.350	3.352	3.340	3.334	3.334
4.174	3.158	3.380	3.382	3.370	3.364	3.364
4.224	3.186	3.410	3.412	3.400	3.394	3.394
4.274	3.214	3.440	3.442	3.430	3.424	3.424
4.324	3.242	3.470	3.472	3.460	3.454	3.454
4.374	3.270	3.500	3.502	3.490	3.484	3.484
4.424	3.298	3.530	3.532	3.520	3.514	3.514
4.474	3.326	3.560	3.562	3.550	3.544	3.544
4.524	3.354	3.590	3.592	3.580	3.574	3.574
4.574	3.382	3.620	3.622	3.610	3.604	3.604
4.624	3.410	3.650	3.652	3.640	3.634	3.634
4.674	3.438	3.680	3.682	3.670	3.664	3.664
4.724	3.466	3.710	3.712	3.700	3.694	3.694
4.774	3.494	3.740	3.742	3.730	3.724	3.724
4.824	3.522	3.770	3.772	3.760	3.754	3.754
4.874	3.550	3.800	3.802	3.790	3.784	3.784
4.924	3.578	3.830	3.832	3.820	3.814	3.814
4.974	3.606	3.860	3.862	3.850	3.844	3.844
5.024	3.634	3.890	3.892	3.880	3.874	3.874
5.074	3.662	3.920	3.922	3.910	3.904	3.904
5.124	3.690	3.950	3.952	3.940	3.934	3.934
5.174	3.718	3.980	3.982	3.970	3.964	3.964
5.224	3.746	4.010	4.012	4.000	3.994	3.994
5.274	3.774	4.040	4.042	4.030	4.024	4.024
5.324	3.802	4.070	4.072	4.060	4.054	4.054
5.374	3.830	4.100	4.102	4.090	4.084	4.084
5.424	3.858	4.130	4.132	4.120	4.114	4.114
5.474	3.886	4.160	4.162	4.150	4.144	4.144
5.524	3.914	4.190	4.192	4.180	4.174	4.174
5.574	3.942	4.220	4.222	4.210	4.204	4.204
5.624	3.970	4.250	4.252	4.240	4.234	4.234
5.674	3.998	4.280	4.282	4.270	4.264	4.264
5.724	4.026	4.310	4.312	4.300	4.294	4.294
5.774	4.054	4.340	4.342	4.330	4.324	4.324
5.824	4.082	4.370	4.372	4.360	4.354	4.354
5.874	4.110	4.400	4.402	4.390	4.384	4.384
5.924	4.138	4.430	4.432	4.420	4.414	4.414
5.974	4.166	4.460	4.462	4.450	4.444	4.444
6.024	4.194	4.490	4.492	4.480	4.474	4.474
6.074	4.222	4.520	4.522	4.510	4.504	4.504
6.124	4.250	4.550	4.552	4.540	4.534	4.534
6.174	4.278	4.580	4.582	4.570	4.564	4.564
6.224	4.306	4.610	4.612	4.600	4.594	4.594
6.274	4.334	4.640	4.642	4.630	4.624	4.624
6.324	4.362	4.670	4.672	4.660	4.654	4.654
6.374	4.390	4.700	4.702	4.690	4.684	4.684
6.424	4.418	4.730	4.732	4.720	4.714	4.714
6.474	4.446	4.760	4.762	4.750	4.744	4.744
6.524	4.474	4.790	4.792	4.780	4.774	4.774
6.574	4.502	4.820	4.822	4.810	4.804	4.804
6.624	4.530	4.850	4.852	4.840	4.834	4.834
6.674	4.558	4.880	4.882	4.870	4.864	4.864
6.724	4.586	4.910	4.912	4.900	4.894	4.894
6.774	4.614	4.940	4.942	4.930	4.924	4.924
6.824	4.642	4.970	4.972	4.960	4.954	4.954
6.874	4.670	5.000	5.002	4.990	4.984	4.984
6.924	4.698	5.030	5.032	5.020	5.014	5.014
6.974	4.726	5.060	5.062	5.050	5.044	5.044
7.024	4.754	5.090	5.092	5.080	5.074	5.074
7.074	4.782	5.120	5.122	5.110	5.104	5.104
7.124	4.810	5.150	5.152	5.140	5.134	5.134
7.174	4.838	5.180	5.182	5.170	5.164	5.164
7.224	4.866	5.210	5.212	5.200	5.194	5.194
7.274	4.894	5.240	5.242	5.230	5.224	5.224
7.324	4.922	5.270	5.272	5.260	5.254	5.254
7.374	4.950	5.300	5.302	5.290	5.284	5.284
7.424	4.978	5.330	5.332	5.320	5.314	5.314
7.474	5.006	5.360	5.362	5.350	5.344	5.344
7.524	5.034	5.390	5.392	5.380	5.374	5.374
7.574	5.062	5.420	5.422	5.410	5.404	5.404
7.624	5.090	5.450	5.452	5.440	5.434	5.434
7.674	5.118	5.480	5.482	5.470	5.464	5.464
7.724	5.146	5.510	5.512	5.500	5.494	5.494
7.774	5.174	5.540	5.542	5.530	5.524	5.524
7.824	5.202	5.570	5.572	5.560	5.554	5.554
7.874	5.230	5.600	5.602	5.590	5.584	5.584
7.924	5.258	5.630	5.632	5.620	5.614	5.614
7.974	5.286	5.660	5.662	5.650	5.644	5.644
8.024	5.314	5.690	5.692	5.680	5.674	5.674
8.074	5.342	5.720	5.722	5.710	5.704	5.704
8.124	5.370	5.750	5.752	5.740	5.734	5.734
8.174	5.398	5.780	5.782	5.7		



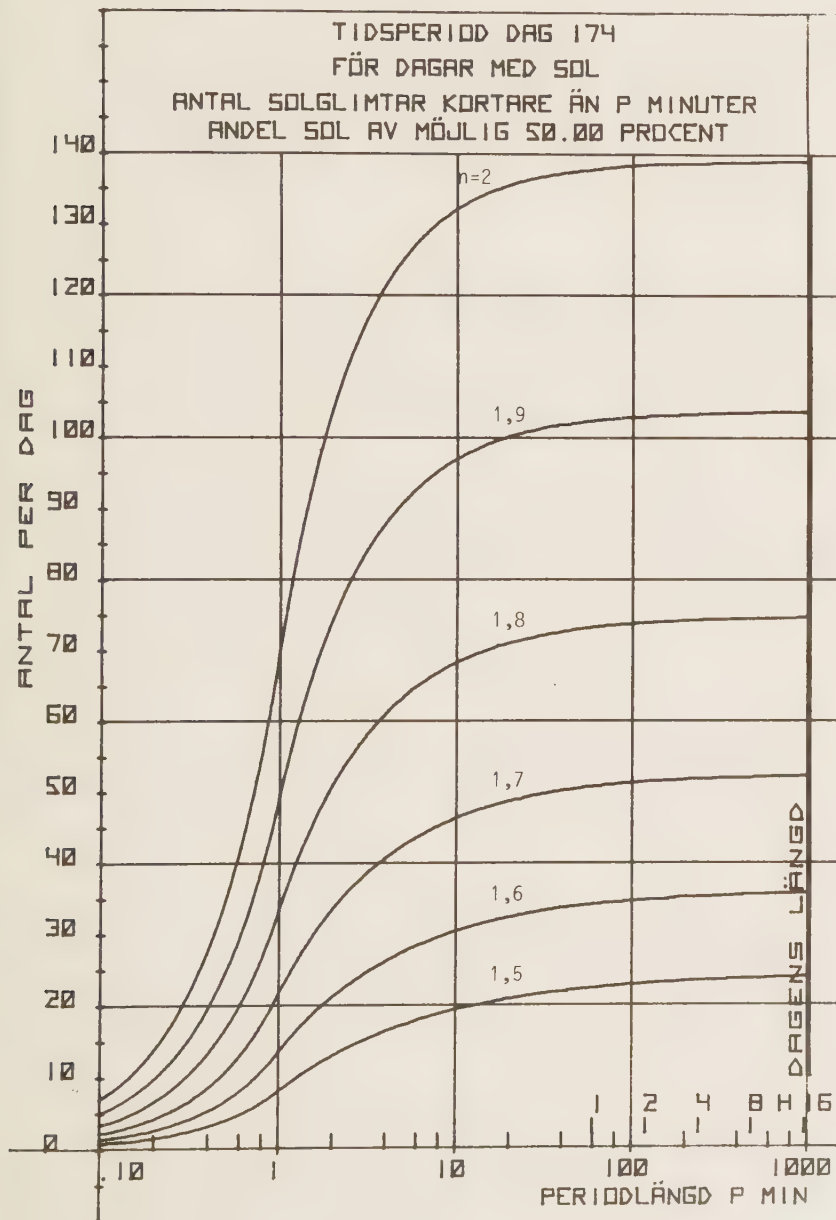
Figur 6.7

Solandel vid fördelningsekvationer enligt figur 6.6



Figur 6.8

Antal solglimtar vid solfördelningsekvationer
enligt figur 6.6



7. GLASFÖRSMUTSNINGENS INVERKAN PÅ TRANSMISSIONEN OCH SOLFÄNGARENS EFFEKTIVITET

Damm och smuts i luften reducerar solstrålningens intensitet, se kapitel 4. Dessutom reduceras solfångarens verkningsgrad genom att smutsen fastnar på solfångaren och reducerar dennas förmåga att uppta solenergin. Hur mycket effektiviteten reduceras beror på luftens försmutsningsgrad och solfångarens konstruktion. Tester i Sverige tyder på att nederbörd förhindrar att nedsmutsningen ökar obegränsat med tiden.

Professor A.A.M. Sayigh från Riadh uppgav vid 2nd Miami International Conference on Alternative Energy Sources, 10 - 13 december 1979, (32) att i Saudi-Arabien sjunker solfångarnas verkningsgrad kraftigt vid sandstormar. Koncentrerande solfångare fungerar som sandfångare och verkningsgraden blir noll om solfångarna ej rengöres.

Enligt Beard et al (2) reduceras transmissionskoefficienten från 0,70 till 0,65 för "Solaris" solfångare när glaset är smutsigt, dvs transmissionen reduceras med 7% vid vinkelrätt ljusinfall. Samma referens uppger att en kondensatfilm på det inre glaset vid dubbelglasning ökar de optiska förlusterna med 10% (eg. procentenheter). Transmissionskoefficienten minskar från 60 till 50%.

Smith et al (33) anger, att transmissionen reduceras vanligen mindre än 5% på grund av smutsigt glas. Samma källa anger att värmekapaciteten i solfångaren har liten inverkan på den användbara energin från solfångaren.

Enligt amerikanska och tyska provningsnormer och enligt de föreslagna svenska provningsnormerna, normerar man transmissionens vinkelberoende, dvs man anger transmissionen i förhållande till transmissionen vid infallsvinkel 0° . Man erhåller således en vinkelkorrektionsfaktor, K , som är av formen

$$K(i) = 1 - b\left(\frac{1}{\cos i} - 1\right) \quad (7.1)$$

Transmissionen som funktion av infallsvinkeln blir

$$\tau(i) = \tau(0) \cdot K(i) \quad (7.2)$$

Vid smutsigt glas brukar man använda samma ekvationer som för rent glas, men med $\tau(i=0)$ reducerat p g a nedsmutsningen. Därvid har man implicit antagit att vinkelkorrektionsfaktorn K inte skulle påverkas av nedsmutsningen. För att kunna testa om detta antagande är riktigt, tillverkade vi en provutrustning enligt figur 7.1.

I provutrustningen mätte jag direktinstrålningens transmission genom rent glas och vid olika nedsmutsning av glaset samt vid varierande infallsvinkel. För att kunna få proven reproducerbara användes tegeldamm som smuts. Olika mängd tegeldamm rördes ut i vatten, som sedan hälldes ut över glaset. När vattnet avdunstat testades glaset.

I figurerna 7.2, 7.3 resp. 7.4 visas resultaten från tre test. Figur 7.2 avser rent 4 mm planglas av Emmabodas fabrikat. Figur 7.3 visar samma glas men smutsigt och figur 7.4 samma men mycket kraftigt nedsmutsat. Transmissionens vinkelberoende för det rena glaset var detsamma som andra forskare, t ex Adamson och Beckman (1), angivit.

Det smutsiga glaset var något smutsigare än en normalt smutsad solfångare. Det mycket kraftigt smutsade glaset representerar förhållanden, som inte förekommer i Sverige.

Transmissionskoefficienten $K(i)$ blev för det rena glaset:

$$K(i) = 1 - 8 \cdot 10^{-5} i^2 + 32 \cdot 10^{-7} i^3 - 4,1 \cdot 10^{-8} i^4 \quad (7.3)$$

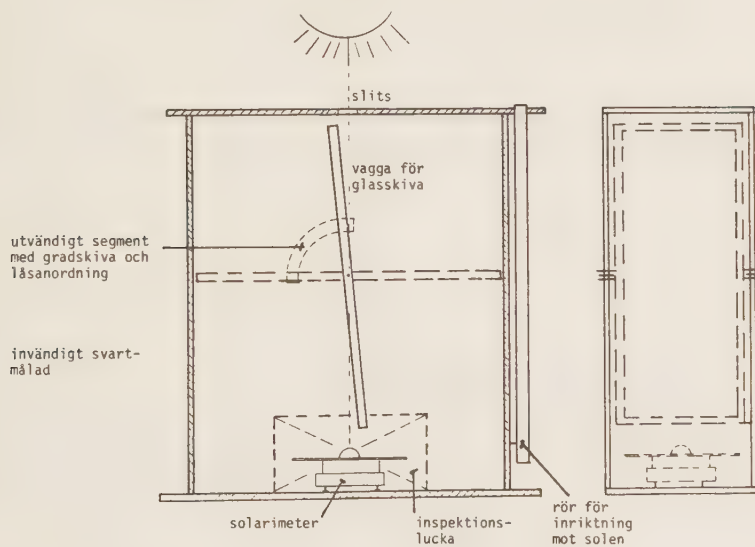
För det smutsiga glaset:

$$K(i) = 1 - 14 \cdot 10^{-5} i^2 + 43 \cdot 10^{-7} i^3 - 4,8 \cdot 10^{-8} i^4 \quad (7.4)$$

För det mycket kraftigt smutsade glaset ($0 < i < 70^\circ$):

$$K(i) = 1 - 17 \cdot 10^{-5} i^2 + 35 \cdot 10^{-7} i^3 - 4 \cdot 10^{-8} i^4 \quad (7.5)$$

Figur 7.1 Provanordning för mätning av direktstrålningens transmission i glas



Eftersom ekvationerna inte sammanfaller blir ej heller förhållandet mellan transmissionen för smutsigt glas och transmissionen för rent glas konstant, dvs oberoende av infallsvinkeln - se figurerna 7.5 och 7.6 - varför det ej är korrekt att använda ekvation (7.2) för smutsigt glas.

Om man vill använda ekvation (7.1) för att ange transmissionens vinkelberoende och sätter b = reduktionen vid $i = 60^\circ$ blir för

det rena glaset: $b = 0,12$

det smutsiga glaset: $b = 0,19$

det kraftigt
smutsade glaset: $b = 0,37$

Man kan använda en annan förenklad ekvation för att ange transmissionens vinkelberoende, nämligen

$$K(i) = 1 - \left(\frac{i}{90^\circ}\right)^b \quad (7.6)$$

varur erhålles för

det rena glaset: $b = 5,23$

det smutsiga glaset: $b = 4,10$

det kraftigt
smutsade glaset: $b = 2,45$

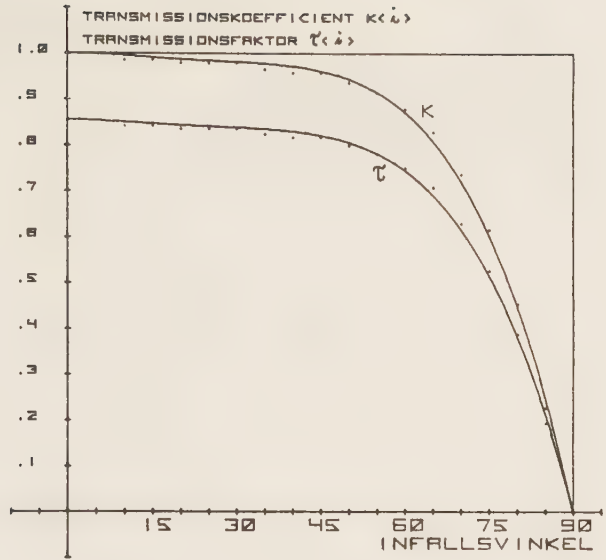
Figurerna 7.7, 7.8 och 7.9 visar hur ekvationerna (7.1) resp. (7.6) ansluter sig till testdata.

En intressant iakttagelse vid testet med det mycket kraftigt smutsade glaset var, att så länge glaset var vått var transmissionen vid vinkelrätt infall 59,3%, men föll till 38,5% när glaset var torrt.

En reducering av transmissionen med några procent på grund av glasförsmutsning låter inte så dramatiskt, men det är inte reduktionen av transmissionen i sig som är av intresse, utan den av den reducerade transmissionen förorsakade reduktionen av uttagbar energi från solfångaren. I kapitel 8 i samband med parametervariationer visas vilken inverkan en ändring av transmissionen får på mängden uttagbar energi.

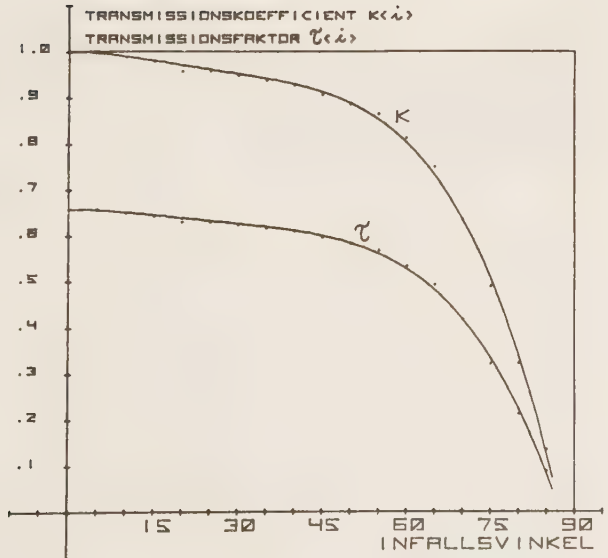
Figur 7.2

Transmission av direktinstrålad solenergi genom 4 mm planglas som funktion av infallsvinkel.



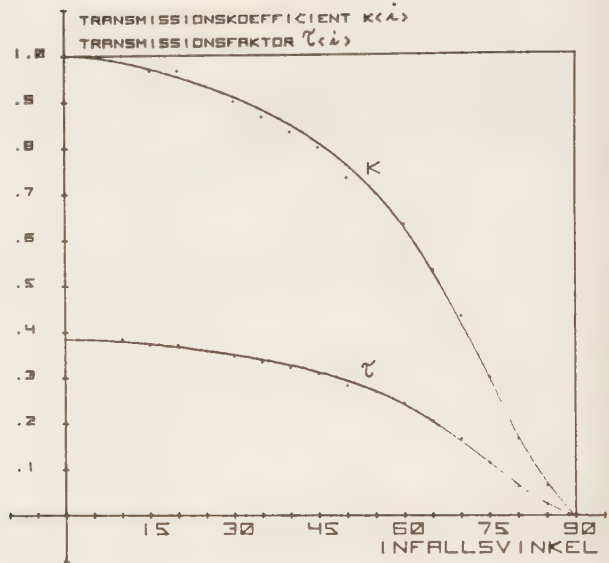
Figur 7.3

Transmission av direktinstrålad solenergi genom smutsigt glas som funktion av infallsvinkel.



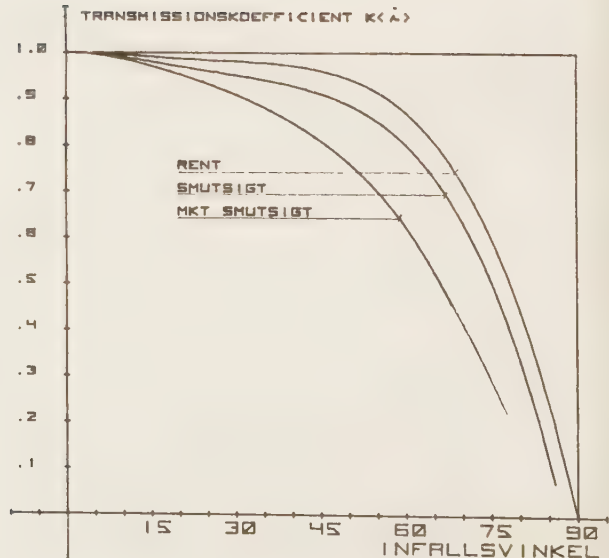
Figur 7.4

Transmission av direktinstrålad solenergi genom mycket kraftigt smutsat glas som funktion av infallsvinkel.



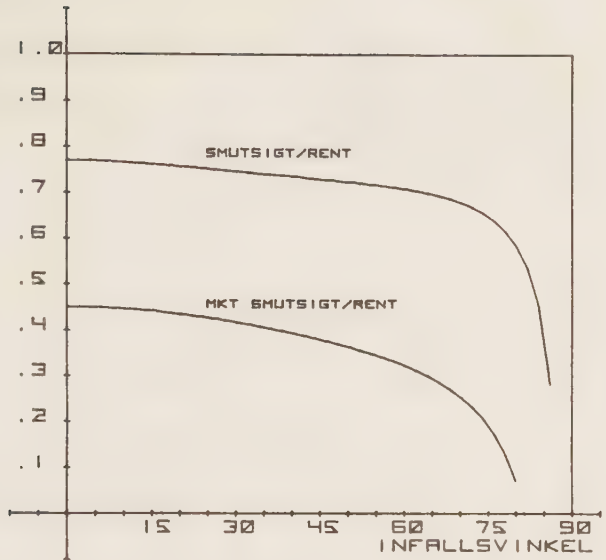
Figur 7.5

Transmission av direktinstrålad solenergi genom rent, smutsigt respektive mycket smutsigt glas som funktion av infallsvinkel.



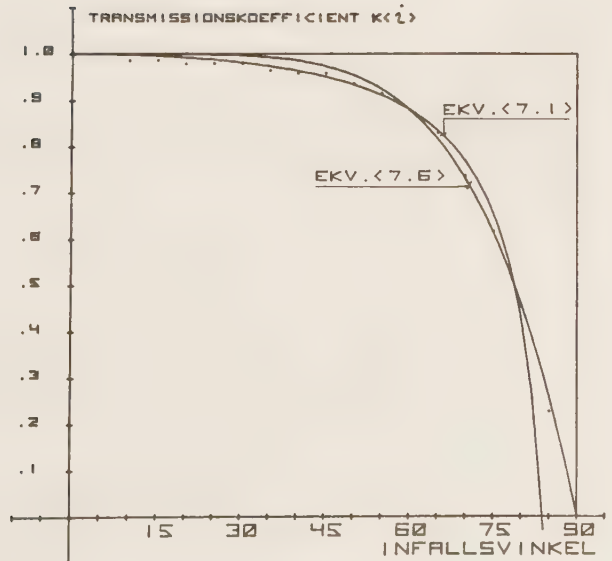
Figur 7.6

Förhållandet mellan transmission av direktinstrålad solenergi genom smutsigt och rent glas som funktion av infallsvinkel.



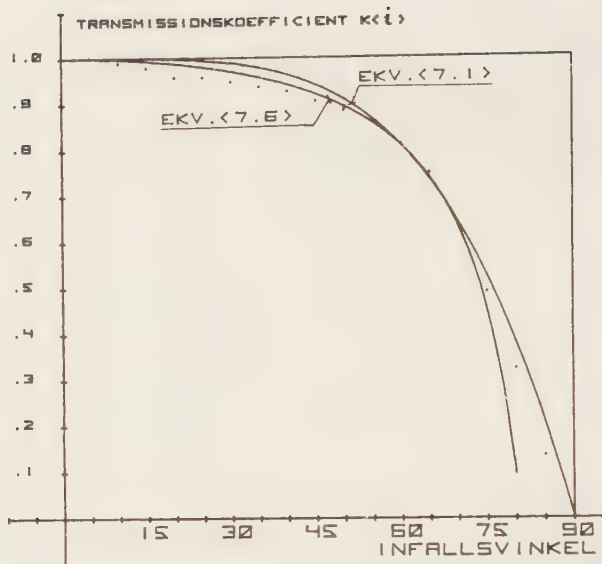
Figur 7.7

Transmission av direktinstrålad solenergi genom rent glas enligt förenklade ekvationer som funktion av infallsvinkel.



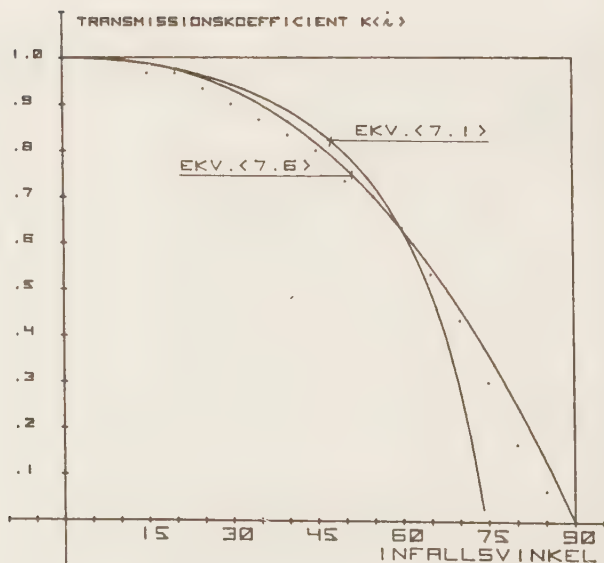
Figur 7.8

Transmission av direktin-
strålad solenergi genom
smutsigt glas enligt för-
enklade ekvationer som
funktion av infallsvinkel.



Figur 7.9

Transmission av direktin-
strålad solenergi genom
mycket smutsigt glas en-
ligt förenklade ekvationer
som funktion av infalls-
vinkel.



8. SOLVÄRMEANLÄGGNINGENS TRANSIENTEGENSKAPER

Temperaturen i olika delar av ett solvärmesystem vid transienta förhållanden har betydelse dels vid beräkning av därav förorsakade förluster, dels vid bestämning av anläggningens driftsstrategi.

De förluster det är frågan om är

- 1) den energi som går åt för att värma upp solfångare och rör-system till värmemagasinet's temperatur, alltså energiupptagningen innan anläggningen kan börja ge uttagbar energi, och
- 2) den energi som förloras vid felaktig strategi, t ex att varm fluid får cirkulera genom solfångaren, när instrålningseffekten är för låg för att anläggningen skall kunna ge effekt.

Förlusterna enligt 2) kan elimineras, men ej förlusterna enligt 1), därför kommer i det följande händelseförloppen vid uppvärmnings- resp. avsvålningsfaserna att analyseras, så att det skall bli möjligt att storleksmässigt bestämma transientförlusterna.

8.1 VID UPPVÄRMNINGSFASEN

Uppvärmningsfasen kan karakteriseras av följande moment:

1. Solfångare och rörssystem inklusive fluiden har under natten antagit omgivningstemperatur, dvs utetemperatur. Fluiden rör sig ej.
2. Solen kommer fram och solfångaren börjar värmas upp.
3. När solfångaren uppnått inställd temperatur (= några grader över magasineringstemperaturen) startar pumpen fluiden. Fluiden går då in i solfångaren och har en temperatur enligt punkt 1.

4. Den varma fluiden i solfångaren ersätts av en svalare. Under detta moment värms både den svala och den varma fluiden. Under denna "tömningstid" har fluiden som lämnar solfångaren en högre temperatur än starttemperaturen.
5. Efter "tömningstiden" faller utgående fluidtemperatur språngvis.
6. Temperaturen enligt punkt 5 gäller under den tid det tar att "tömma" rörledningssystemet.
7. Skulle rörledningens "tömningstid" vara kortare än solfångarens, kan det passera flera temperaturfronter genom solfångaren innan denna "tömts" och jämvikt uppstått.
8. Är rörledningens "tömningstid" längre än solfångarens, matas solfångaren med magasinstemperatur efter det rörledningen "tömts".
9. Efter det rörledningen "tömts" enligt punkt 8, tar det ytterligare "tömningstiden" för solfångaren innan temperaturen i solfångaren har stabiliserats.

Punkt 6 förutsätter, att det finns en värmeväxlare eller en shuntventil vid magasinet, så att detta ej tillförs vatten förrän rörsystemet "tömts". Finnes ej värmeväxlare eller shuntventil, tar "tömningen" av rörledningen bara halva tiden jämfört med punkterna 6, 7 och 8, dvs tiden för att tömma ledningen från magasinet till solfångaren. Under denna tid uppstår det en förlust på grund av att det svala vattnet i ledningen från solfångaren till magasinet pumpas in i magasinet och sänker medeltemperaturen i detta.

8.1.1 Analytiska uttryck för temperatur- och energitillskott i solfångare

En solfångare är sammansatt av flera olika materialskikt, vilka vid drift får olika temperatur. För att förenkla beräkningarna är det brukligt att använda den förenkling som Close (7) infört, nämligen att låta de olika skikten representeras av en punkt i absorberplåten och att hela solfångaren har samma temperatur som punkten.

Solfångarens värmekapacitet hänförd till denna punkt är solfångarens effektiva värmekapacitet $(mC_p)_e$, som enligt Duffie (15) är

$$(mC_p)_e = (mC_p)_p + \sum_{i=1}^n a_i (mC_p)_i \quad (8.1)$$

vari a_i är förhållandet mellan den totala värmeförlustfaktorn, U_L , och värmeförlustfaktorn från i:te skiktet till omgivningen, U_i .

Solfångarens effektiva värmekapacitet per m^2 solfångaryta blir

$$C_c = (mC_p)_e / A \quad (8.2)$$

Om absorbatoren tillförs en konstant effekt S per m^2 och värmeförlusten samtidigt är q_L per m^2 , kan den upplagrade energin q per m^2 solfångare beräknas och därmed även temperaturen i solfångaren.

I de närmast följande avsnitten härleds ekvationer för energitillskott och temperatur i solfångare som funktion av tid. Först för solfångare med stillastående fluid, därefter med fluid vars temperatur i inloppet är samma som omgivningens, sedan med fluid som har godtycklig inloppstemperatur. Eftersom stagnationstemperaturen har speciell betydelse härleds ekvationen även för denna.

8.1.1.1 Vid stillastående fluid, dvs när uttagbar effekt = 0

$$\frac{dq}{dt} = S - q_L(t) \quad (8.3)$$

$$C_c \frac{d(T_p - T_a)}{dt} = S - U_L(T_p - T_a) \quad (8.4)$$

Vid tiden $t(0)$ är $T_p = T_a$. Detta ger

$$q(t) = S\tau(1 - e^{-t/\tau}) \quad (8.5)$$

med

$$\tau = \frac{C_c}{U_L} \quad (8.6)$$

Ekvation (8.5) medför

$$\text{att maximal laddning } q_{\max} = S\tau \quad (8.7)$$

$$\text{att när } t \rightarrow \infty \text{ dvs vid } q_{\max} \text{ är } q_L = S \quad (8.8)$$

Ekvationen (8.5) kan skrivas

$$\frac{q}{S\tau} = 1 - e^{-t/\tau} \quad (8.9)$$

vilket ger

$$t = -\tau \ln(1 - \frac{q}{S\tau}) \quad (8.10)$$

som är uppladdningstiden vid konstant S.

Ekvationerna (8.4) och (8.8) ger

$$S = U_L(T_p - T_a) \quad (8.11)$$

som i sin tur ger stagnationstemperaturen

$$T_{p_{\max}} = \frac{S}{U_L} + T_a \quad (8.12)$$

8.1.1.2 Vid cirkulerande fluid, vars inloppstemperatur = utetemperaturen

$$\frac{dq}{dt} = S - q_L(t) - q_u(t) \quad (8.13)$$

$$q_u = \dot{m}C_p(T_u - T_i)/A = G C_p(T_u - T_i) \quad (8.14)$$

($T_i = T_a$ införs först senare i detta avsnitt för att härledningarna skall kunna användas även i nästa avsnitt.)

Om temperaturstegringen antages linjär, erhålles

$$T_m = \frac{T_u + T_i}{2} \quad (8.15)$$

och

$$q_u = 2 G C_p (T_m - T_i) \quad (8.16)$$

q_u kan även beräknas ur

$$q_u = F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (8.17)$$

som ger

$$T_i - T_a = \frac{S}{U_L} - \frac{q_u}{U_L F_R} \quad (8.18)$$

och ur

$$q_u = S - U_L (T_p - T_a) \quad (8.19)$$

som ger

$$T_p - T_a = \frac{S}{U_L} - \frac{q_u}{U_L} \quad (8.20)$$

Ekvation (8.20) minus (8.18) ger

$$T_p - T_i = \frac{q_u}{U_L} \left(\frac{1}{F_R} - 1 \right) \quad (8.21)$$

Enligt Klein et al (16) är

$$T_m - T_i = \frac{q_u}{U_L} \left[\frac{1}{F_R} - \frac{1}{F'} \right] \quad (8.22)$$

(vilket följer av att q_u även är

$$q_u = F' [S - U_L (T_m - T_a)])$$

Ekvation (8.22) genom (8.21) ger

$$\frac{T_m - T_i}{T_p - T_i} = \frac{\frac{1}{F_R} - \frac{1}{F_T}}{\frac{1}{F_R} - 1} = \frac{1 - \frac{F_R}{F_T}}{1 - \frac{F_R}{F_T}} \quad (8.23)$$

varav erhålles

$$T_m - T_i = \frac{1 - \frac{F_R}{F_T}}{1 - \frac{F_R}{F_T}} (T_p - T_i) \quad (8.24)$$

Med detta infört i ekvation (8.16) och med $T_i = T_a$ erhålles

$$C_c \frac{d(T_p - T_a)}{dt} = S - U_L (T_p - T_a) - 2 G C_p (T_p - T_a) \cdot \frac{1 - \frac{F_R}{F_T}}{1 - \frac{F_R}{F_T}} \quad (8.25)$$

Med antagandet att S , U_L och T_a är konstant och att $T_p = T_a$ vid $t = 0$, blir lösningen = ekvation (8.5), men med

$$\tau = \frac{C_c}{U_L + 2 G C_p \cdot \frac{1 - \frac{F_R}{F_T}}{1 - \frac{F_R}{F_T}}} \quad (8.26)$$

T_m enligt ekvation (8.15) är en approximation, ty temperaturtillväxten från inlopp till utlopp sker exponentiellt. Approximationen kan elimineras genom att q_u beräknas ur ekvation (8.21), dvs

$$q_u = \frac{U_L (T_p - T_i)}{\frac{1}{F_R} - 1} \quad (8.27)$$

och införes i ekvation (8.25)

$$C_c \frac{d(T_p - T_a)}{dt} = S - U_L (T_p - T_a) - \frac{U_L (T_p - T_a)}{\frac{1}{F_R} - 1} \quad (8.28)$$

Lösningen blir oförändrad, men tidskonstanten blir

$$\tau = \frac{C_c}{U_L + \frac{1}{\frac{1}{F_R} - 1}} = \frac{C_c}{U_L (1 + \frac{1}{\frac{1}{F_R} - 1})} = \frac{(1 - F_R)C_c}{U_L} \quad (8.29)$$

Ekvation (8.5) kan skrivas

$$q(t) = S\tau(1 - e^{-t/\tau}) = C_c [T_p(t) - T_a] \quad (8.30)$$

vilket ger, om $T_p = T_a$ vid $t = 0$,

$$T_p(t) = S\tau(1 - e^{-t/\tau})/C_c + T_a \quad (8.31)$$

Stagnationstemperaturen $T_{p_{\max}}$ erhålles vid $t = \infty$

$$T_{p_{\max}} = S\tau/C_c + T_a \quad (8.32)$$

$$T_{p_{\max}} = (1 - F_R)\frac{S}{U_L} + T_a \quad (8.33)$$

Tiden för att uppnå fortfarighet beräknas med hjälp av ekvation (8.30) och (8.10).

8.1.1.3 Vid cirkulerande fluid, vars inloppstemperatur är godtycklig

Att $T_i = T_a$ är ett specialfall. Tar man bort specialiseringen, kan ekvation (8.28) skrivas

$$C_c \frac{dT_p}{dt} - S + U_L(T_p - T_a) = \begin{cases} 0 & \text{om } T_p < T_i \\ \frac{U_L(T_p - T_i)}{\frac{1}{F_R} - 1} & \text{om } T_p \geq T_i \end{cases} \quad (8.34)$$

som vid konstant S , U_L , T_a och T_i har lösningen

$$q(t) = \begin{cases} S\tau_1(1 - e^{-t/\tau_1}) & \text{om } t < t_{T_i} \\ C_c(T_i - T_a) + S\tau_2(1 - e^{-\frac{t-t_{T_i}}{\tau_2}}) & \text{om } t \geq t_{T_i} \end{cases} \quad (8.35)$$

med

$$\tau_1 = \frac{C_c}{U_L}$$

och

$$\tau_2 = \frac{C_c}{U_L}(1 - F_R) \left(1 - \frac{U_L(T_i - T_a)}{S}\right) \quad (8.36)$$

Absorbatortemperaturen T_p som funktion av tiden erhålles analogt med ekvation (8.31) om $T_p = T_a$ vid $t = 0$:

$$T_p(t) = \begin{cases} S\tau_1(1 - e^{-t/\tau_1})/C_c + T_a & \text{om } t < t_{T_i} \\ \left[C_c(T_i - T_a) + S\tau_2(1 - e^{-\frac{t-t_{T_i}}{2}}) \right] / C_c + T_a & \text{om } t \geq t_{T_i} \end{cases} \quad (8.37)$$

Stagnationstemperaturen erhålles genom att sätta dT_p/dt i ekvation (8.34) = 0, vilket ger

$$S - U_L(T_p - T_a) = \frac{U_L(T_p - T_i)}{\frac{1}{F_R} - 1} \quad (8.38)$$

som i sin tur ger

$$T_{p_{\max}} = F_R T_i + (1 - F_R) \left(\frac{S}{U_L} + T_a \right) \quad (8.39)$$

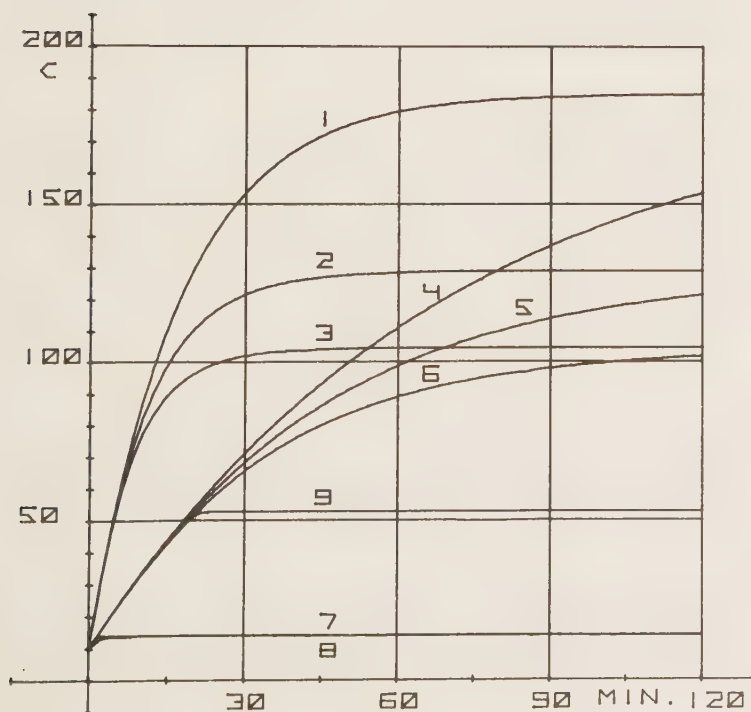
Absorbatortemperaturen T_p som funktion av tiden visas grafiskt i figur 8.1 för olika tidskonstant τ . För de fall där U_L är en funktion av T_p har vid beräkningarna använts U_L för föregående tidssteg.

Figur 8.1 Temperaturstegringen i solfångare med olika tidskonstant och med och utan cirkulerande vatten.

Data: $I = 1000 \text{ W/m}^2$, $(\tau\alpha) = 0,7$, $U_{L_0} = 4,0 \text{ W/(m}^2\text{/K)}$, $F' = 1$,

$$U_L = U_{L_0} \left(\frac{T+273}{273} \right)^n, T_a = +10^\circ\text{C}$$

Kurva 1	$C_c = 4,19 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$	$G = 0$	$n = 0$	
" 2	- " -	- " -	$n = 1$	
" 3	- " -	- " -	$n = 1,9$	
" 4	$C_c = 16,74 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$	- " -	$n = 0$	
" 5	- " -	- " -	$n = 1$	
" 6	- " -	- " -	$n = 1,9$	
" 7	$C_c = 4,19 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$	$G = 0,02$	$n = 0$	$T_i = +10^\circ\text{C}$
" 8	$C_c = 16,74 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$	- " -	$n = 1,9$	- " -
" 9	- " -	- " -	- " -	$T_i = +50^\circ\text{C}$



8.1.1.4 Inklusive rörledningsförluster.

Som framgår av avsnitt 8.1 ger solfångaren inte användbar energi till lagret förrän både solfångare och rörsystem är uppvärmda till magasinets botten temperatur. Är man inte intresserad av inpendlingsförloppet utan enbart av när solfångaren börjar ge användbar energi till lagret, kan denna tidpunkt beräknas med hjälp av det analytiska beräkningssättet. Rörsystemets värmekapacitet och värmeförlust räknas därvid in i solfångarens motsvarande värden. Rörsystemets värmekapacitet kan betraktas som en förstoring av solfångarens vatteninnehåll och den sammanlagda effektiva värmekapaciteten beräknas med hjälp av ekvation (8.1):

$$(mC_p)_{(C+R)_e} = (mC_p)_{C_e} + (mC_p)_R \cdot \frac{U_L}{U_0} \quad (8.40)$$

Man betraktar fluiden som stillastående, även om den cirkulerar runt i solfångar- och rörsystemet. Den skenbara tidskonstant, τ^* , som gäller intill dess solfångare och rörsystem värmts upp till magasinets botten temperatur, beräknas ur

$$\tau^* = \frac{(mC_p)_{(C+R)_e}}{(U_L A)_C + (UA)_R} \quad (8.41)$$

Användningen av τ^* framgår av följande två exempel.

<u>Förutsättningar:</u>	A_C	$= 1000 \text{ m}^2$
	A_R	$= 100 \text{ m}^2$
	$(mC_p)_R$	$= 10000 \text{ kJ/K}$
	U_R	$= 0,5 \text{ W/(m}^2/\text{K)}$
	T_a	$= + 10 \text{ }^\circ\text{C}$
	T_M	$= + 50 \text{ }^\circ\text{C}$

Exempel 1: Solfångare III enligt kurva 3 i figur 8.1

$$\tau_{III} = \frac{1000 \cdot 4190}{1000 \cdot 4} = 1048 \text{ s}$$

$$\tau_{III}^* = \frac{1000 \cdot 4190 + 10000000}{1000 \cdot 4 + 100 \cdot 0,5} = 3504 \text{ s}$$

Exempel 2: Solfångare VI enligt kurva 6 i figur 8.1

$$\tau_{VI} = \frac{1000 \cdot 16760}{1000 \cdot 4} = 4190 \text{ s}$$

$$\tau_{VI}^* = \frac{1000 \cdot 16760 + 10000000}{1000 \cdot 4 + 100 \cdot 0,5} = 6607 \text{ s}$$

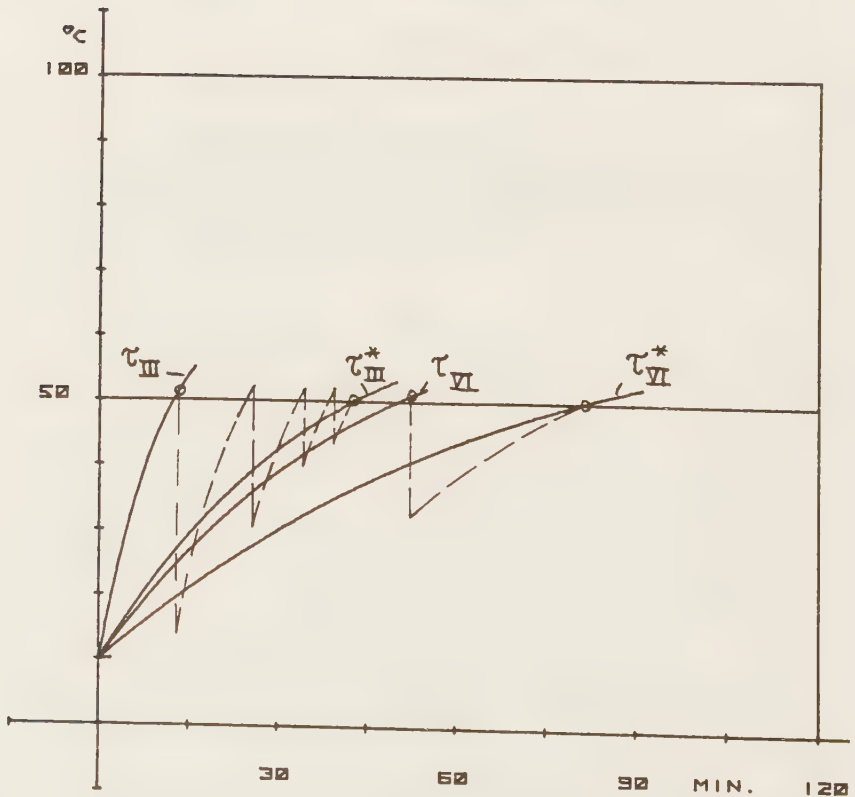
Temperaturförloppet enligt dessa tidskonstanter framgår av figur 8.2. När kurvorna för de skenbara tidskonstanterna τ^* skär linjen för 50°C börjar anläggningarna ge användbar energi till lagret.

Det tar således tid att värma upp rörledningarna, vilket innebär en energiförlust. Har rörledningarna väl blivit uppvärmda är deras värmeförluster små i förhållande till solfångarens. Storleksmässigt framgår detta av att i normala solvärmeanläggningar för bostadsuppvärmning är solfångarens U-värde ca 10 gånger större än rörledningens och dess area ca 30 gånger större än rörledningens, dvs rörledningens värmeförluster är av storleksordningen 1/300 av solfångarens. Man kan också uttrycka det så, att rörledningsförlusten motsvarar en effekt av 1 å 2 W per m² solfångare.

Rörledningens värmeförlust är inte till hela sitt belopp förlorad, ty den temperatursänkning som förlusten förorsakar i ledningen mellan magasinet och solfångare, medför att solfångarens effekt ökar.

Är värmeförlusten från rörledningen $\dot{Q}_R$, är tilllopps- och frånloppsledningarna till solfångarna lika långa och är massflödet $\dot{m}$ blir den temperatursänkning, ΔT_R , som värmeförlusten förorsakar i ledningen mellan magasinet och solfångaren

Figur 8.2 Temperaturförändringen i två olika solfångare med tidskonstanten τ_{III} resp. τ_{VI} vid konstant instrålning och konstant omgivningstemperatur. När önskad temperatur ($+50^{\circ}\text{C}$) uppnåtts, sker en inpendling tills även rörledningsvattnet uppnått denna temperatur. Detta sker där den skenbara tidskonstanten τ_{III}^* resp. τ_{VI}^* skär önskad temperatur ($+50^{\circ}\text{C}$).



$$\Delta T_R = \frac{\dot{Q}_R}{2\dot{m}C_p} \quad (8.42)$$

Inloppstemperaturen till solfångaren blir

$$T_i = T_M - \Delta T_R \quad (8.43)$$

och den användbara effekten från systemet

$$\dot{Q}_{u_s} = AF_R \left[S - U_L (T_M - \Delta T_R - T_a) - \dot{Q}_R \right] \quad (8.44)$$

Användbara effekten från solfångaren när $\dot{Q}_R = 0$ (dvs $T_i = T_M$) är

$$\dot{Q}_u = AF_R \left[S - U_L (T_M - T_a) \right] \quad (8.45)$$

Skillnaden mellan ekvationerna (8.45) och (8.44) utgör den effekt-förlust som rörledningsförlusten förorsakar systemet, dvs

$$\begin{aligned} \dot{Q}_u - \dot{Q}_{u_s} &= AF_R \left[S - U_L (T_M - T_a) \right] - \\ &AF_R \left[S - U_L (T_M - \Delta T_R - T_a) \right] - \dot{Q}_R = \dot{Q}_R - AF_R U_L \Delta T_R \end{aligned} \quad (8.46)$$

Eftersom $AU_L \Delta T_R = \dot{Q}_R/2$ kan ekvation (8.46) skrivas

$$\dot{Q}_u - \dot{Q}_{u_s} = \dot{Q}_R - \frac{\dot{Q}_R}{2} F_R = \dot{Q}_R \left(1 - \frac{F_R}{2} \right) \quad (8.47)$$

I utgående ledning från solfångaren är värmeförlusten $\dot{Q}_R/2$, varför förlusten i ledningen till solfångaren åstadkommer systemförlusten

$$\dot{Q}_{R_s} = \dot{Q}_R \left(1 - \frac{F_R}{2} \right) - \frac{\dot{Q}_R}{2} = \frac{\dot{Q}_R}{2} (1 - F_R) \quad (8.48)$$

Eftersom F_R i allmänhet är nära 1, återvinnes det mesta av värmeförlusten från ledningen till solfångaren när solfångaren ger effekt.

Istället för att beräkna förlusten kan man beräkna hur mycket större den kritiska instrålningen, I_c , måste vara för att kompensera rörledningsförlusten. Utan rörledningsförluster erhålles I_c från ekvationen (3.8). Med rörledningsförluster ger ekvation (8.44)

$$AF_R [I_c(\tau\alpha) - U_L(T_M - \Delta T_R - T_a)] - \dot{Q}_R = 0 \quad (8.49)$$

vilket ger

$$I_c = \frac{U_L}{(\tau\alpha)} \left[T_M - T_a + \frac{\dot{Q}_R}{U_L AF_R} - \Delta T_R \right] \quad (8.50)$$

Vid $\dot{Q}_u = 0$ är $T_i = T_M$ och skillnaden i I_c , dvs ΔI_c , för de båda fallen är ekvation (8.50) minus ekvation (3.8), som ger

$$\Delta I_c = \frac{U_L}{(\tau\alpha)} \left[\frac{\dot{Q}_R}{U_L AF_R} - \Delta T_R \right] \quad (8.51)$$

$$\frac{\dot{Q}_R}{U_L A} = 2 \cdot \Delta T_R \quad (8.52)$$

(Temperaturstegringen i solfångaren är = temperaturfallet i hela rörledningen vid $\dot{Q}_u = 0$. ΔT_R är temperaturfallet i halva ledningen.) Ekvation (8.51) kan därför skrivas

$$I_c = \frac{U_L}{(\tau\alpha)} \left[\frac{2 \cdot \Delta T_R}{F_R} - \Delta T_R \right] = \frac{U_L}{(\tau\alpha)} \left[\Delta T_R \left(\frac{2}{F_R} - 1 \right) \right] \quad (8.53)$$

Ekvation (8.42) till (8.53) medför, att om totala rörlängden är given bör sträckan mellan solfångaren och magasinet göras så kort som möjligt för att mängden uttagbar energi skall bli så stor som möjligt.

Vid dimensionering av solvärmeanläggningar brukar man, som t ex Girdo (12), addera värmeförlusterna från såväl rörledning som värmelager till lasten. Utöver denna reella värmeförlust tillkommer den effekt- och energiminskning som den ökade kritiska instrålningseffekten enligt ekvation (8.53) förorsakar, när solfångaren är i drift.

8.2 VID AVSVALNINGSFASEN

Avsvalningsfasen kan karakteriseras av följande moment:

1. Solfångaren ger effekt och är i fortfarighetstillstånd.
2. Solen går i moln, varvid solfångaren och rörsystemet börjar svalna.
3. Cirkulationspumpen fortsätter att gå den tid det tar att "tömma" solfångaren, dvs att sänka temperaturen i hela solfångaren till T_i , vilket i regel tar 1 ä 2 minuter.
4. När utgående solfångaretemperatur sjunkit till magasinets bottentemperatur stoppar pumpen.

8.2.1 Analytiska uttryck för temperatur- och energiändringen i solfångare

I det ögonblick solfångaren intelängre ger användbar energi, är temperaturen i solfångaren och rörsystemet T_p . Den upplagrade energin i solfångaren, räknat från utetemperaturen T_a , är därvid

$$q = C_c (T_p - T_a) \quad (8.54)$$

Förlusteffekten, $\dot{q}_L$, är samtidigt

$$\dot{q}_L = U_L (T_p - T_a) \quad (8.55)$$

Detta ger

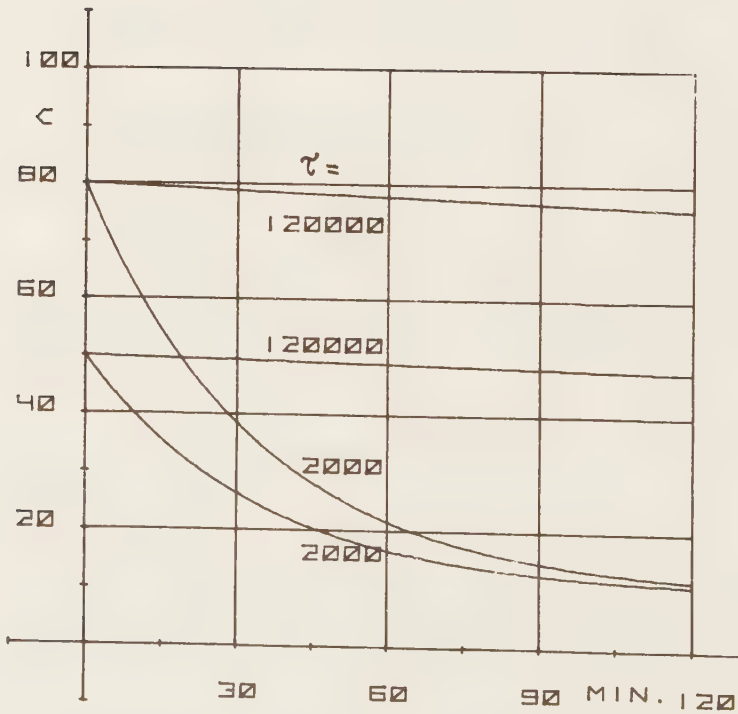
$$C_c \frac{d(T_p - T_a)}{dt} = C_c (T_p - T_a) - U_L (T_p - T_a) \quad (8.56)$$

som vid konstant T_a och U_L har lösningen

$$q(t) = C_c (T_p \Big|_{t=0} - T_a) \cdot e^{-t/\tau} \quad (8.57)$$

Figur 8.3

Avsvalningsförloppet i solfångare med $\tau = 2000$ resp. $120\,000$ s
vid $T_i = 80$ resp. 50°C och vid $T_a = 10^\circ\text{C}$.
Enligt ekvation (8.58).



Eftersom q är proportionell mot $(T_p - T_a)$ gäller för temperaturen T_p

$$T_p(t) = \left[T_p \Big|_{t=0} - T_a \right] e^{-t/\tau} + T_a \quad (8.58)$$

Tidskonstanten τ blir

$$\tau = \frac{C_c}{U_L} \quad (8.59)$$

vilket är samma som gäller för uppvärmningsfasen. Ekvation (8.3) och (8.4) skulle därför också kunna tagas som utgångspunkt för härledning av avsvälningsekvationerna om S sättes till noll och randvillkoren ändras.

Ekvation (8.58) visas grafiskt för två temperaturnivåer och två tidskonstanter i figur 8.3.

8.3 VID OMVÄXLANDE UPPVÄRMNING OCH AVSVÄLNING

8.3.1 Beräkning av temperaturförlopp i solfångare med hjälp av analytiska uttryck

Om en solfångare exponeras för en konstant strålningsintensitet som dessemellan avbryts, kan temperaturförloppet i solfångaren beräknas med hjälp av ekvationerna i avsnitt 8.1.1 och 8.2.1. Under uppvärmningsfaserna används ekvation (8.37) och under avsvälningsfaserna ekvation (8.58). Temperaturen vid en avsvälningsperiods slut ger starttemperaturen för nästa uppvärmningsperiod. Uppvärmningsfaserna börjar således inte vid tiden $t = 0$, utan vid den tid det skulle ta att värma upp solfångaren till aktuell temperatur. Denna tid erhålles ur

$$t = -\tau \ln \left[1 - \frac{C_c (T_p - T_a)}{S\tau} \right] \quad (8.60)$$

som är en sammansättning av ekvation (8.9) och (8.54).

I figur 8.4 a - h visas temperaturförloppet för två solfångare med olika effektiv värmekapacitet, två instrålningsintensiteter och vid två exponeringsintervall, men båda givande 50% exponeringstid. Dessutom visas hur temperaturflödet skulle bli vid kontinuerlig exponering. Figurerna visar naturligtvis, att temperaturen stiger snabbast i solfångaren med liten effektiv värmekapacitet och till högst temperatur vid den största instrålningsintensiteten. Det intressanta är att studera amplituden hos temperatursvängningarna.

I exemplen har det inte tagits ut någon användbar energi, men under den tid temperaturen ligger över önskad temperatur skulle energi kunna uttagas. Är den önskade temperaturen 80°C ser man, att den tunga solfångaren inte i något av fallen når upp till denna, medan den lätta gör det vid den högre instrålningsintensiteten. Andelen av tiden som detta sker är längre vid det längre exponeringsintervallet än vid det korta. Detta framgår enklast därav, att om man höjer upp önskad temperatur till 90°C , så ger inte heller den lätta solfångaren uttagbar energi i fallet med kort exponeringsintervall.

Exemplen vill visa, att om en solfångare utsätts för solstrålning 50% av möjlig soltid, är det inte betydelselöst hur soltiden är fördelad under dagen och det är ej heller betydelselöst om solfångaren har stor eller liten termisk massa.

8.3.2 Beräkning av temperaturförlopp, uttagbar energi och transientverkningsgrad enligt numerisk metod

8.3.2.1 Vid fasta sol/molnintervall

Om någon eller några av faktorerna i differentialekvationerna i föregående avsnitt inte är konstanta i tidssteget, gäller ej de analytiska lösningarna, utan ekvationerna löses lämpligen numeriskt.

För att bringa ned räknearbetet vid den numeriska beräkningen har jag antagit att temperaturstegringen i solfångaren är linjär. Vid

Figur 8.4

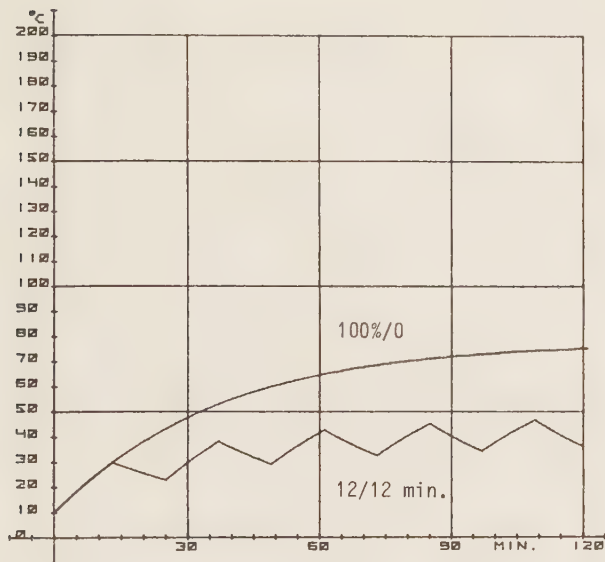
a - b

Temperaturförloppet i solfångare med

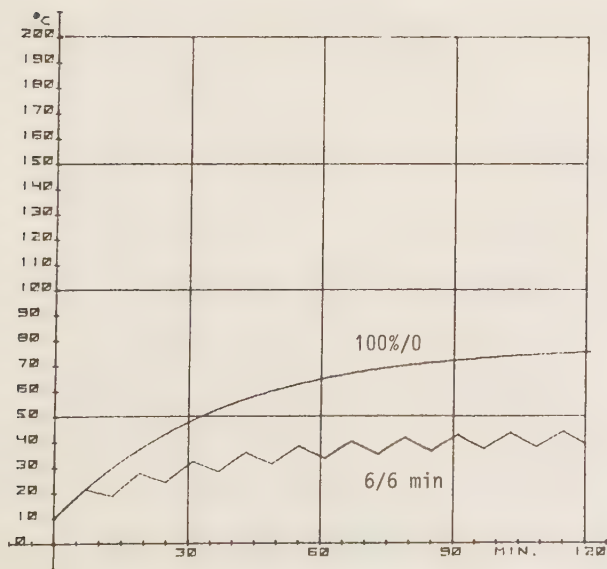
$$I = 500 \text{ W/m}^2, U_{L0} = 4 \text{ W/(m}^2\text{K)}, U_L = U_{L0} \left(\frac{T+273}{273} \right), (\tau\alpha) = 0,7,$$

$$T_a = 10^\circ\text{C}, A = 1,0 \text{ m}^2, G = 0 \text{ kg/s}, C_c = 12 \text{ kJ/K}.$$

Sol/molnförhållande = 12/12 resp. 6/6 min. samt 100%/0.



a



b

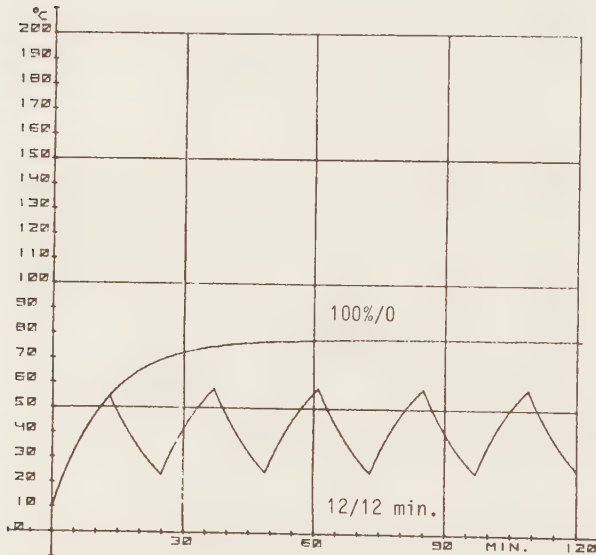
Figur 8.4

Temperaturförloppet i solfångare med

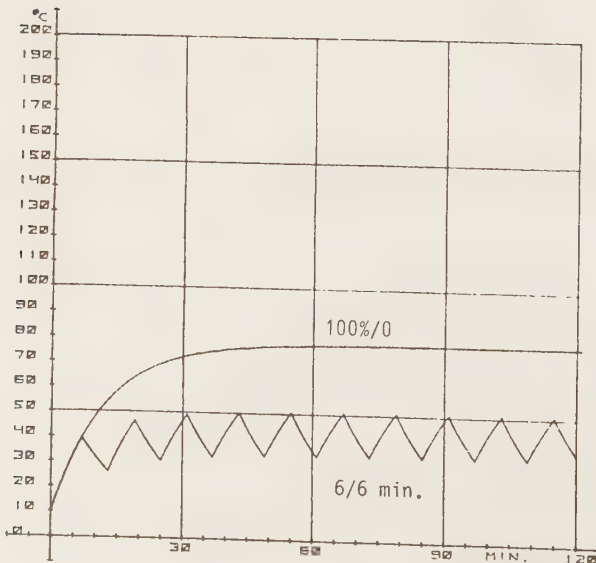
c - d

$$I = 500 \text{ W/m}^2, U_{L0} = 4 \text{ W/(m}^2\text{K)}, U_L = U_{L0} \left(\frac{T+273}{273} \right), (\tau\alpha) = 0,7, \\ T_a = 10^\circ\text{C}, A = 1,0 \text{ m}^2, G = 0 \text{ kg/s}, C_c = 4 \text{ kJ/K.}$$

Sol/molnförhållande = 12/12 resp. 6/6 min. samt 100%/0.



c



d

Figur 8.4

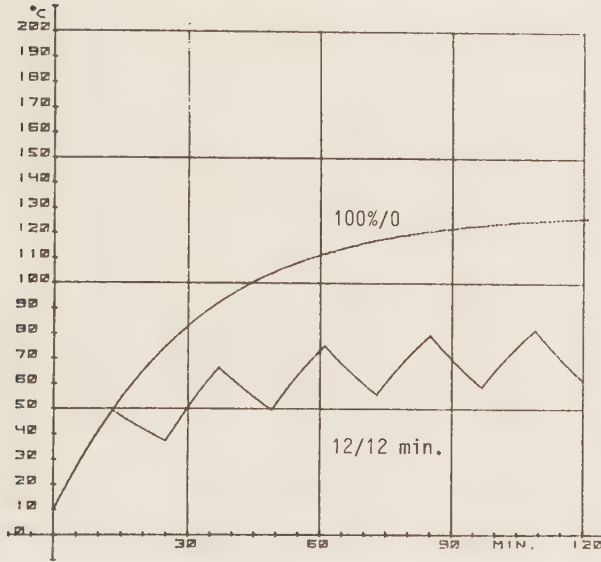
e - f

Temperaturförloppet i solfångare med

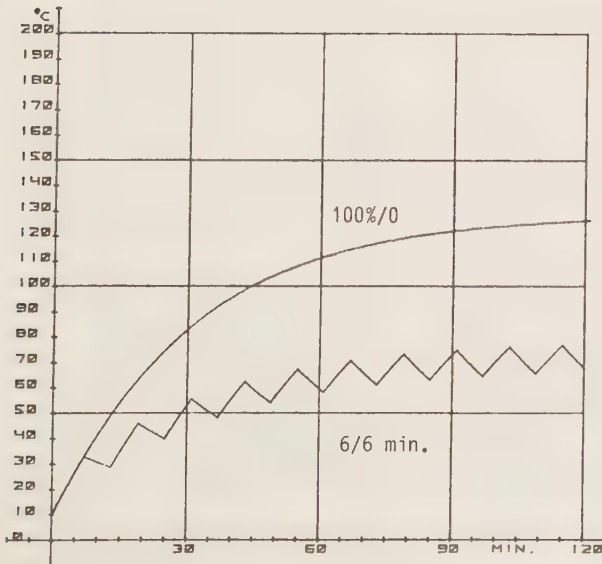
$$I = 1000 \text{ W/m}^2, U_{L0} = 4 \text{ W/(m}^2\text{K)}, U_L = U_{L0} \left(\frac{T+273}{273} \right), (\tau\alpha) = 0,7,$$

$$T_a = 10^\circ\text{C}, A = 1,0 \text{ m}^2, G = 0 \text{ kg/s}, C_c = 12 \text{ kJ/K}.$$

Sol/molnförhållande = 12/12 resp. 6/6 min. samt 100%/0.



e



f

Figur 8.4

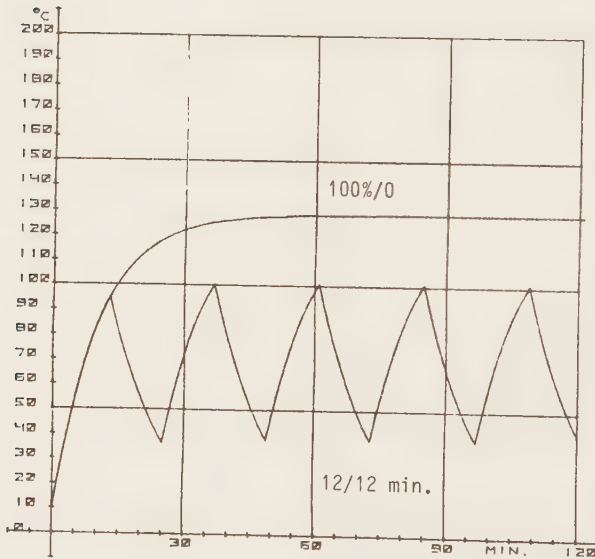
Temperaturförloppet i solfångare med

g - h

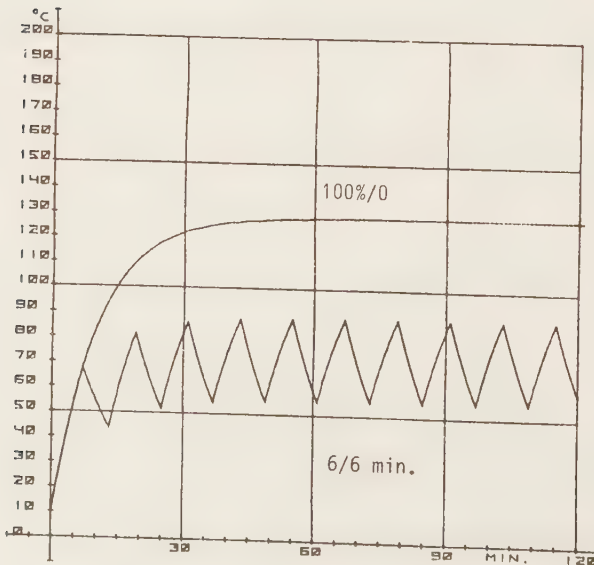
$$I = 1000 \text{ W/m}^2, U_{L0} = 4 \text{ W/(m}^2\text{K)}, U_L = U_{L0} \left(\frac{T+273}{273} \right), (\tau\alpha) = 0,7,$$

$$T_a = 10^\circ\text{C}, A = 1,0 \text{ m}^2, G = 0 \text{ kg/s}, C_c = 4 \text{ kJ/K}.$$

Sol/molnförhållande = 12/12 resp. 6/6 min. samt 100%/0.



g



h

normala massflöden genom solfångaren varierar temperaturökningen i solfångaren mellan 0 och 5 K, varför avvikelserna mellan exponentiell och linjär temperaturtillväxt blir mycket liten. Jag har därför utgått från ekvation (8.25), som vid godtycklig inloppstemperatur kan skrivas

$$C_c \frac{dT_p}{dt} = S - U_L(T_p - T_a) - 2 G C_p \left(\frac{1 - \frac{F_R}{F_T}}{1 - \frac{F_R}{F_T}} \right) (T_p - T_i) \quad (8.61)$$

Denna ekvation gäller vid varierande förhållanden - således både vid uppvärmnings- och avsvämningsförlopp. Differentialekvationen har lösts enligt Runge-Kuttas metod på en bordsdator HP 9820A.

För att testa programmeringen gjordes bl a en beräkning motsvarande den analytiska i figur 8.4. Beräkningarna gjordes för en solfångare med $C_c = 4,186 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$ och med $U_{L0} = 2 \text{ alt. } 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. S vid sol = 500 och vid moln = 100 W/m^2 . Resultatet visas i figur 8.5. Härav syns klart, att temperaturen pendlar kring ett medelvärde som bestäms av andelen sol och som är oberoende av svängningarnas frekvens eller amplitud.

Ekvation (8.61) har lösts för följande värden på de valbara parametrarna:

Latitud = 56° (Lund)

Plana solfångare, riktade åt söder, lutande 45° .

Fluid = vatten.

Massflöde $G = 0,02, 0,01, 0,005$ resp. $0,0015 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$ när solfångaren ger effekt, annars 0.

$F' = 1$.

$(\tau\alpha) = 0,8$ resp. $0,72$.

$U_{L0} = 0,3$ resp. $6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$n = 1$ i $U_L = U_{L0} \left(\frac{T_p + 273}{273} \right)^n$

$C_c = 0,2, 4,186, 12,558$ resp. $25,116 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$

Dag nr 87, 174 resp. 348 och i något fall även för dag nr 130 och 260.

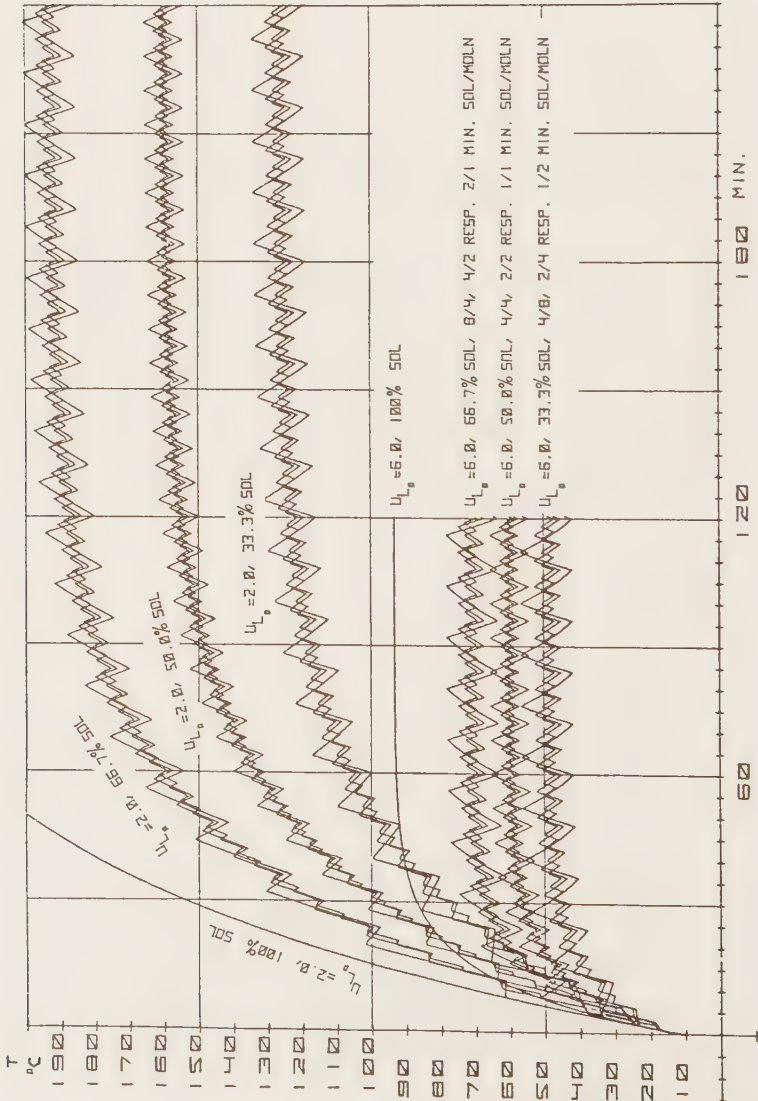
Figur 8.5

Temperaturförloppet i solfångare med $C_c = 4,186 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$,

$U_{L0} = 2 \text{ resp. } 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $(\tau\alpha) = 0,8$, $T_a = 10^\circ\text{C}$, $I_{\text{sol}} = 500 \text{ W/m}^2$,

$I_{\text{moln}} = 100 \text{ W/m}^2$, $\dot{m} = 0$.

Olika sol-moln-perioder.



Andel sol under dagen = 20, 33 1/3, 50 resp. 100%.

Solperiodernas längd vid intermittent sol = 6, 12, 30 minuter resp. dagens längd.

Molnperiodernas längd vid intermittent sol = 0, 6, 12, 24, 30, 48, 60 resp. 120 minuter.

$T_i = 50$ resp. 70°C .

Solfångaren inklusive fluid antas under natten ha antagit omgivningens temperatur, T_a .

Flödet har startat, när temperaturen uppnått en temperatur 5 K högre än T_i .

Parametern S , som motsvaras av $I_T(\tau\alpha)$ i ekvation (3.1), har beräknats med hjälp av instrålningsdata enligt kapitel 4.

Parametern T_a har beräknats enligt kapitel 5.

Vid beräkningarna har samtidigt solfångaretemperaturen och användbara energin plottats som funktion av tiden. Ett urval av dessa diagram visas i bilaga 1. För övrigt redovisas resultaten i tabellerna 8.1 - 8.13. I tabellerna redovisas under dagen insamlad energimängd samt därvid uppnådd transientverkningsgrad, η_{tr} , dvs erhållen energimängd i förhållande till den energimängd som skulle erhållits, om den effektiva värmekapaciteten varit 0, således

$$\eta_{tr} = \frac{Q(C_c)}{Q(C_c = 0)}$$

Resultaten har dessutom systematiserats och värdena plottats in i olika diagram som visar energimängden resp. η_{tr} som funktion av effektiv värmekapacitet, U_L -värde, inloppstemperatur, andel sol under dagen resp. dagnummer.

Figur 8.6 visar den uttagbara energimängden från en solfångare med $U_{L0} = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ och $T_i = 50^\circ\text{C}$ för tre olika dagar som funktion av solfångarens effektiva värmekapacitet och med sol/molnperiodernas längd som parameter - alla parametrarna givande 50% sol under dagen. Därav framgår att den uttagbara energin inte påverkas nämnvärt av den termiska massan om solen lyser från morgon till kväll. Detta är helt i överensstämmelse med vad andra forskare redovisat. Om instrålningen däremot fördelas på kortare och flera intervall, så avtar den

användbara energin när solperiodernas längd avtar. Av diagrammen framgår också, att energin avtar snabbare med ökad termisk massa ju kortare dagen är.

Figur 8.7 visar transientverkningsgraden, η_{tr} , för samma fall som figur 8.6.

Figurerna 8.8 och 8.9 visar samma som figurerna 8.6 och 8.7 men gällande för 33 1/3 % sol under dagen.

Figurerna 8.10 och 8.11 visar samma som 8.6 och 8.7 men gällande för 20 % sol under dagen.

En jämförelse mellan de olika diagrammen visar, att η_{tr} avtar snabbare med ökad termisk massa ju kortare del av dagen solen lyser. Detta belyses också av figur 8.12, i vilken η_{tr} har plottats som funktion av andel sol under dagen för en given solfångare.

Figurerna 8.13 och 8.14 visar samma som figurerna 8.6 och 8.7 men gällande för $T_i = 70^{\circ}\text{C}$.

En jämförelse mellan figur 8.7 och 8.14 visar, att η_{tr} avtar snabbare med ökad termisk massa vid högre inloppstemperatur, T_i .

I figur 8.15 har η_{tr} plottats som funktion av inloppstemperaturen för en given solfångare. Därav framgår att η_{tr} avtar med stigande inloppstemperatur, T_i .

Figurerna 8.16 och 8.17 visar samma som 8.6 och 8.7 men gällande för U_L -värde = $3,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

En jämförelse mellan diagrammen visar att η_{tr} avtar snabbare med ökad värmekapacitet vid stigande U_L -värde.

I figur 8.18 har $Q(U_L)/Q(U_L = 0)$ plottats som funktion av solfångarens U_L -värde. Den användbara energin avtar med stigande U_L -värde. Figuren visar att detta avtagande sker snabbare ju kortare sol/moln-perioderna är, resp. ju kortare dagen är.

INSAMLAD ENERGI FÖR SOLFANGARE MED OLIKA EFFEKTIV VÄRMEKAPACITET, C_c

Ort: Lund

Magasinstemp, $T_M = 50^\circ\text{C}$

Plan solfångare

Starttemperatur, $T_M + 5^\circ\text{C}$ Lutning: 45° , mot söder $G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ $(\tau\alpha) = 0,8$, $U_{L_0} = 6,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Andel sol = 50%

Insamlad energimängd, $\text{kWh}/(\text{m}^2/\text{dag})$, och i förhållande
till energimängden vid värmekapaciteten $C_c = 0$.

C_c $\text{kJ}/(\text{m}^2\text{K})$	Sol min	Moln min	Dag nr 348		Dag nr 87		Dag nr 174		Temperaturför- lopp, se dia- gram i bilaga
			kWh	%	kWh	%	kWh	%	
0,2	100%	0%	0,101/2	~100	1,987/2	~100	3,477/2	~100	1
0,2	6	6	0,042	83,2	0,869	87,5	1,621	93,2	2
0,2	12	12	0,045	89,1	0,929	93,5	1,682	96,8	
4,19	100%	0%	0,097/2	96,0	1,982/2	99,7	3,471/2	99,8	
4,19	6	6	0	0	0,383	38,6	1,269	73,0	
4,19	12	12	0	0	0,581	58,5	1,419	81,6	
4,19	30	30	0,012	23,8	0,779	78,4	1,566	90,1	
12,56	100%	0%			1,964/2	98,8			3
12,56	6	6	0	0	0,220	22,1	1,145	65,9	
12,56	12	12	0	0	0,311	31,3	1,212	69,7	
12,56	30	30	0	0	0,510	51,3	1,360	78,2	
25,12	100%	0%	0	0	1,909/2	96,1	3,410/2	98,1	
25,12	6	6	0	0	0,0997	10,0	1,084	62,4	
25,12	12	12	0	0	0,167	16,8	1,094	62,9	
25,12	30	30	0	0	0,316	31,8	1,214	69,8	
31,40	6	6	0	0	0,082	8,3	1,058	60,9	
41,86	100%	0%	0	0	1,804/2	90,8	3,327/2	95,7	
41,86	6	6	0	0	0,049	4,9	1,044	60,0	
41,86	12	12	0	0	0,076	7,6	0,987	56,9	
41,86	30	30	0	0	0,175	17,6	1,095	63,0	
66,98	100%	0%					3,176/2	91,3	
66,98	6	6					0,939	54,0	
66,98	12	12					0,923	53,1	
66,98	30	30					0,929	53,4	

INSAMLAD ENERGI FÖR SOLFÄNGARE MED OLIKA EFFEKTIV VÄRMEKAPACITET, C_c

Ort: Lund

Plan solfångare

Lutning; 45° , mot söder $(\tau\alpha) = 0,8$, $U_{L_0} = 6,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ Magasinstemp, $T_M = 50^\circ\text{C}$ Starttemperatur, $T_M + 5^\circ\text{C}$ $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$

Andel sol = 33 1/3 %

Insamlad energimängd, kWh/(m ² dag), och i förhållande till energimängden vid värmekapaciteten C _C = 0.									Temperaturförlopp, se diagram i bilaga
C _C kJ/(m ² K)	Sol min	Moln min	Dag nr 348		Dag nr 87		Dag nr 174		
			kWh	%	kWh	%	kWh	%	
0,2	100%	0%	0,101/3	~100	1,987/3	~100	3,477/3	~100	1
0,2	12	24	0,027	80,2			1,122	96,8	
4,19	100%	0%	0,097/3	96,0	1,982/3	99,7	3,471/3	99,8	
4,19	12	24	0	0	0,318	48,0	0,882	76,1	
4,19	30	60	0,012	35,6	0,520	78,5	1,044	90,1	
25,12	100%	0%	0	0	1,909/3	96,1	3,410/3	98,1	
25,12	6	12	0	0	0	0	0,412	35,5	
25,12	12	24	0	0	0	0	0,486	41,9	
25,12	30	60	0	0	0,071	10,7	0,663	57,2	

Andel sol = 20%

Tabell 8.3

Insamlad energimängd, kWh/(m ² /dag), och i förhållande till energimängden vid värmekapaciteten C _c = 0.									Temperaturförlopp, se diagram i bilaga
C _c kJ/(m ² K)	Sol min	Moln min	Dag nr 348		Dag nr 87		Dag nr 174		
			kWh	%	kWh	%	kWh	%	
0,2	100%	0%	0,101/5	100	1,987/5	100	3,477/5	100	1
25,12	12	48	0	0	0	0	0,113	16,2	
25,12	30	120	0	0	0	0	0,295	42,4	4

INSAMLAD ENERGI FÖR SOLFÄNGARE MED OLIKA EFFEKTIV VÄRMEKAPACITET, C_c

Ort: Lund

Plan solfångare

Lutning: 45° , mot söder $(\tau_\alpha) = 0,8$, $U_{L_0} = 3,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ Magasinstemp, $T_M = 50^\circ\text{C}$ Starttemperatur, $T_M + 5^\circ\text{C}$ $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$

Andel sol: 50%

Insamlad energimängd kWh/(m ² dag), och i förhållande till energimängden vid värmekapaciteten C _C = 0.									Temperaturförlopp, se diagram i bilaga
C _C kJ/(m ² K)	Sol min	Moln min	Dag nr 348		Dag nr 87		Dag nr 174		
			kWh	%	kWh	%	kWh	%	
0,2	100%	0%	0,810/2	~100	3,442/2	~100	4,565/2	~100	
0,2	12	12	0,376	92,8	1,672	97,2	2,235	97,9	
4,19	6	6	0,139	34,3	1,267	73,6	2,062	90,3	
4,19	12	12	0,184	45,4	1,348	78,3	2,112	92,5	
4,19	30	30	0,268	66,2	1,482	86,1	2,171	95,1	5
12,56	100%	0%	0,748/2	92,3	3,381/2	98,2	4,522/2	99,1	6
12,56	6	6	0,044	10,9	1,182	68,7	2,036	89,2	
12,56	12	12	0,070	17,3	1,215	70,6	2,030	88,9	
12,56	30	30	0,131	32,3	1,303	75,7	2,082	91,2	
25,12	100%	0%	0,645/2	79,6	3,272/2	95,1	4,447/2	97,4	
25,12	6	6	0	0	1,072	62,3	1,974	86,5	7
25,12	12	12	0	0	1,079	62,7	1,954	85,6	
25,12	30	30	0,031	7,7	1,125	65,4	1,999	87,6	8

Ort: Lund

Plan solfångare

Lutning: 45° , mot söder $(\tau_\alpha) = 0,8$, $U_{L_0} = 0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ Magasinstemp, $T_M = 50^\circ\text{C}$ Starttemperatur, $T_M + 5^\circ\text{C}$ $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$

Andel sol: 50%

Tabell 8.5

Insamlad energimängd, kWh/(m ² dag), och i förhållande till energimängden vid värmekapaciteten C _c = 0								Temperaturförlopp, se diagram i bilaga	
C _c kJ/(m ² K)	Sol min	Moln min	Dag nr 348		Dag nr 87		Dag nr 174		
			kWh	%	kWh	%	kWh		%
12,56	100%	0%	1,684/2		5,140/2		5,817/2		

INSAMLAD ENERGI FÖR SOLFANGARE MED OLIKA EFFEKTIV VÄRMEKAPACITET, C_C

Ort: Lund

Magasinstemp, $T_M = 50^{\circ}\text{C}$

Plan solfångare

Starttemperatur, $T_M + 5^{\circ}\text{C}$ Lutning: 45° , mot söder $G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ $(\tau\alpha) = 0,8$, $U_{L_0} = 6,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Andel sol: 50%

Insamlad energimängd, kWh/(m ² dag), och i förhållande till energimängden vid värmekapaciteten C _C = 0.								Temperaturförlopp, se diagram i bilaga	
C _C kJ/(m ² K)	Sol min	Moln min	Dag nr		Dag nr 130		Dag nr 260		
			kWh	%	kWh	%	kWh		%
0,2	100%	0%			3,0236/2 1,512		2,4897/2 1,245		

Tabell 8.7

Insamlad energimängd, kWh/(m ² dag), och i förhållande till energimängden vid värmekapaciteten C _c = 0.									Temperaturförlopp, se diagram i bilaga
C _c kJ/(m ² K)	Sol min	Moln min	Dag nr 348		Dag nr 87		Dag nr 174		
			kWh	%	kWh	%	kWh	%	
0,2	100%	0%	0		0,897/2	100	2,096/2	100	9
0,2	12	12	0		0,424	94,5	1,015	96,9	10
4,19	6	6	0		0	0	0,398	38,0	
4,19	12	12	0		0,108	24,1	0,590	56,3	
4,19	30	30	0		0,291	64,9	0,831	79,3	
12,56	6	6	0		0	0	0,218	20,8	
12,56	12	12	0		0	0	0,320	30,5	
12,56	30	30	0		0,069	15,4	0,543	51,8	
25,12	100%	0%	0		0,834/2	93,0	2,028/2	96,8	
25,12	6	6	0		0	0	0,106	10,1	
25,12	12	12	0		0	0	0,166	15,8	
25,12	30	30	0				0,340	32,4	
41,86	100%	0%	0				1,930/2	92,1	
41,86	6	6	0		0	0	0,050	4,8	
41,86	12	12	0		0	0	0,064	6,1	
41,86	30	30	0		0	0	0,185	17,7	
66,98	100%	0%					1,743/2	83,2	

INSAMLAD ENERGI FÖR SOLFANGARE MED OLIKA EFFEKTIV VÄRMEKAPACITET, C_c

Ort: Lund

Plan solfångare

Lutning: 45° , mot söder

$(\tau_\alpha) = 0,8$, $U_{L_0} = 6,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Magasinstemp, $T_M = 50^\circ\text{C}$

Starttemperatur, $T_M + 5^\circ\text{C}$

$G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$

Andel sol: 50%

$T_a = 20^\circ\text{C}$ konstant under dagen

Insamlad energimängd, kWh/(m ² dag), och i förhållande till energimängden vid värmekapaciteten C _c = 0.									Temperaturförlopp, se diagram i bilaga
C _c kJ/(m ² K)	Sol min	Moln min	Dag nr 348		Dag nr 87		Dag nr 174		
			kWh	%	kWh	%	kWh	%	
4,19	100%	0%					3,352/2 =1,676		11
12,56							3,336/2 =1,668		
20,93							3,312/2 =1,656		
29,30							3,281/2 =1,640		
37,67							3,245/2 =1,623		
46,05							3,206/2 =1,603		
54,42							3,165/2 =1,583		
62,79							3,122/2 =1,561		
71,16							3,077/2 =1,538		

INSAMLAD ENERGI FÖR SOLFANGARE MED OLIKA EFFEKTIV VÄRMEKAPACITET, C_c
OCH VID OLIKA ÖVERTEMPERATUR VID START

Ort: Lund

Magasinstemp, $T_M = 50^\circ\text{C}$

Plan solfångare

12/12 min. sol/moln

Lutning: 45° , mot söder

$$G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$$
$$(\tau\alpha) = 0,8, U_{L_0} = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Andel sol: 50%

Insamlad energimängd, kWh(m ² dag)						Temperaturförlopp se diagram i bilaga
C _c kJ/(m ² K)	SoI min	MoIn min	Starttemperatur		Dag nr 174	
			T _M +	=		
25,12	12	12	0	50	1,153	
			5	55	1,094	
			10	60	0,783	
			15	65	0,786	
			20	70	0,670	
			25	75	0,491	
41,86	12	12	0	50	1,076	

INSAMLAD ENERGI FÖR SOLFÄNGARE MED OLIKA TRANSMISSION
(τ_{α}) VID RENT RESPEKTIVE SMUTSIGT GLAS

Tabell 8.10

Ort: Lund

Dag nr 174

Plan solfångare

Starttemp. 5 K över magasinstemperaturen

Lutning: 45° , mot söder

$$G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$$
$$U_{L_0} = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$
$$C_c = 12,56 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$$

Insamlad energimängd, kWh/(m ² dag), och i förhållande till energimängden vid rent glas.									Temperaturförlopp, se diagram i bilaga
Sol	Moln	(τ _α)	Exponent i ekv. (7.8)	(τ _α) för diff.strl.	Måqasinste mp.				
					50°C		70°C		
					kWh	%	kWh	%	
100%	0	0,80	5,2	0,704	3,447	100	2,065	100	
100%	0	0,72	5,2	0,633	2,928	84,9	1,603	77,6	
100%	0	0,72	4,1	0,583	2,810	81,5	1,527	74,0	
30min	30min	0,80	5,2	0,704	1,360	100	0,543	100	
30min	30min	0,72	5,2	0,633	1,106	81,3	0,359	66,1	
30min	30min	0,72	4,1	0,583	1,053	77,4	0,332	61,1	

Ort: Lund

Plan solfångare

Lutning: 45° , mot söder $(\tau\alpha) = 0,8$, $U_{L_0} = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ Magasinstemp, $T_M = 50^{\circ}\text{C}$ Starttemperatur, $T_M + 5^{\circ}\text{C}$ $G = 0,01 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$

Andel sol: 50%

Insamlad energimängd, kWh/(m ² dag), och i förhållande till energimängden vid värmekapaciteten C _c = 0.									Temperaturförlopp, se diagram i bilaga
C _c kJ/(m ² K)	Sol min	Moln min	Dag nr 348		Dag nr 87		Dag nr 174		
			kWh	%	kWh	%	kWh	%	
0,21	100%	0			1,885/2 (0,9423)	~100%	3,312/2 (1,656)	~100%	
4,19	30	30			0,728	77,3	1,478	89,2	
12,56	30	30	0	0	0,450	47,8	1,268	76,6	
25,12	30	30			0,270	28,7	1,121	67,7	
4,19	12	12			0,517	54,9	1,319	79,6	
12,56	12	12	0	0	0,262	27,8	1,127	68,0	
25,12	12	12	0	0	0,153	16,2	1,041	62,7	

Tabelle 8.12

Som tabell 8.11, men $G = 0,005$.									
0,21	100%	0			1707/2 (853,6)	~100%	3020/2 (1510)	~100%	
4,19	30	30			641	75,1	1322	87,5	
12,56	30	30	0	0	367	43,0	1110	73,5	
25,12	30	30			212	24,8	989	65,5	

Tabelle 8.13

Som tabell 8.11, men $G = 0,0015$.									
0,21	100%	0	59/2		1172/2 (586)	~100%	2102/2 (1051)	~100%	
12,56	30	30			202	34,5	728	69,3	

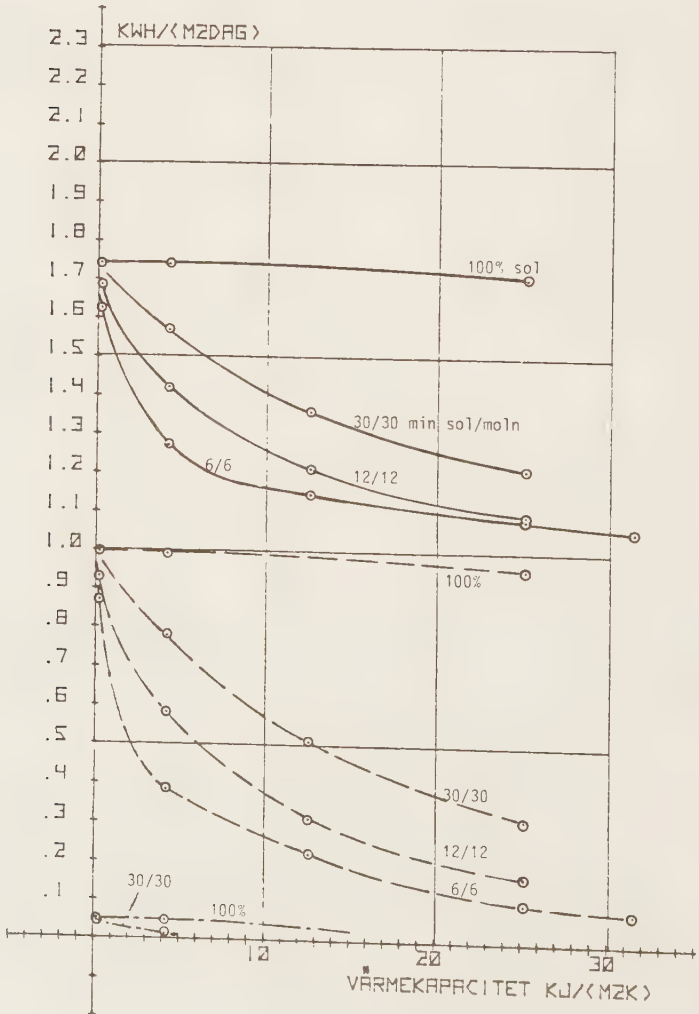
Figur 8.6

Energiutbytet i kWh/(m²dag) för solfångare vid varierande effektiv värmekapacitet och varierande sol/molnförhållanden och vid följande data:

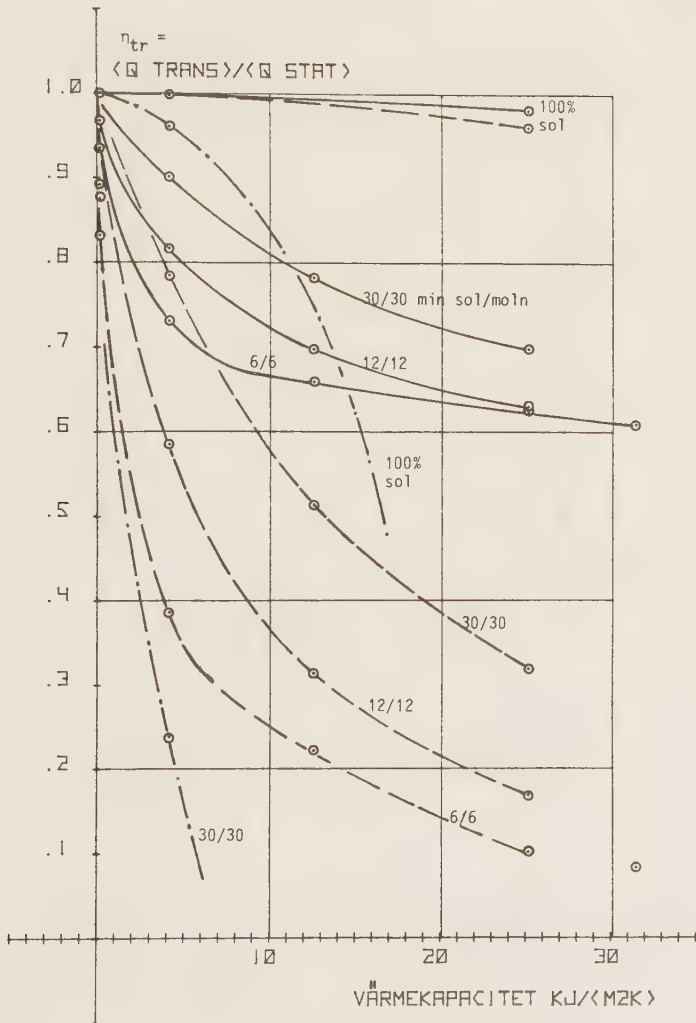
$$U_{L_0} = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}, (\tau\alpha) = 0,8, T_i = 50^\circ\text{C}, \sigma_s = 50\%, \gamma = 45^\circ,$$

$$\phi = 56^\circ (\text{Lund}), G = 0,02 \text{ kg/m}^2\text{s}, T_{\text{start}} = 55^\circ\text{C}.$$

———— = dag 174 Kurvorna för 100% sol redovisar
 - - - - - = dag 87 hälften av energiutbytet vid
 — · — · — = dag 348 en hel dags solsken.



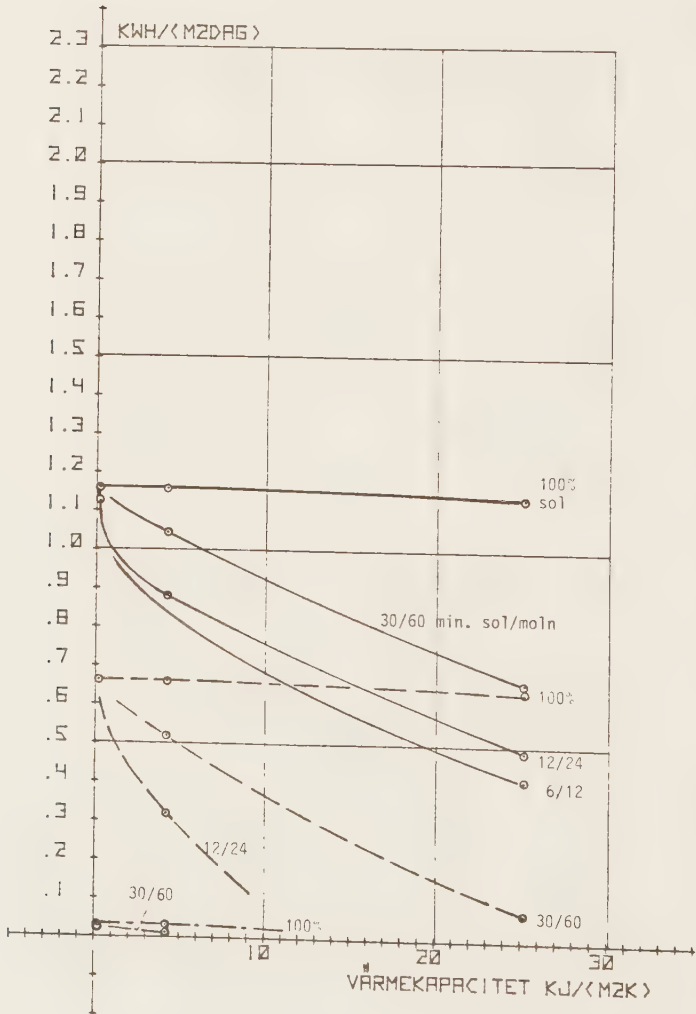
Figur 8.7 Transientverkningsgraden för solfångarna enligt figur 8.6



Figur 8.8

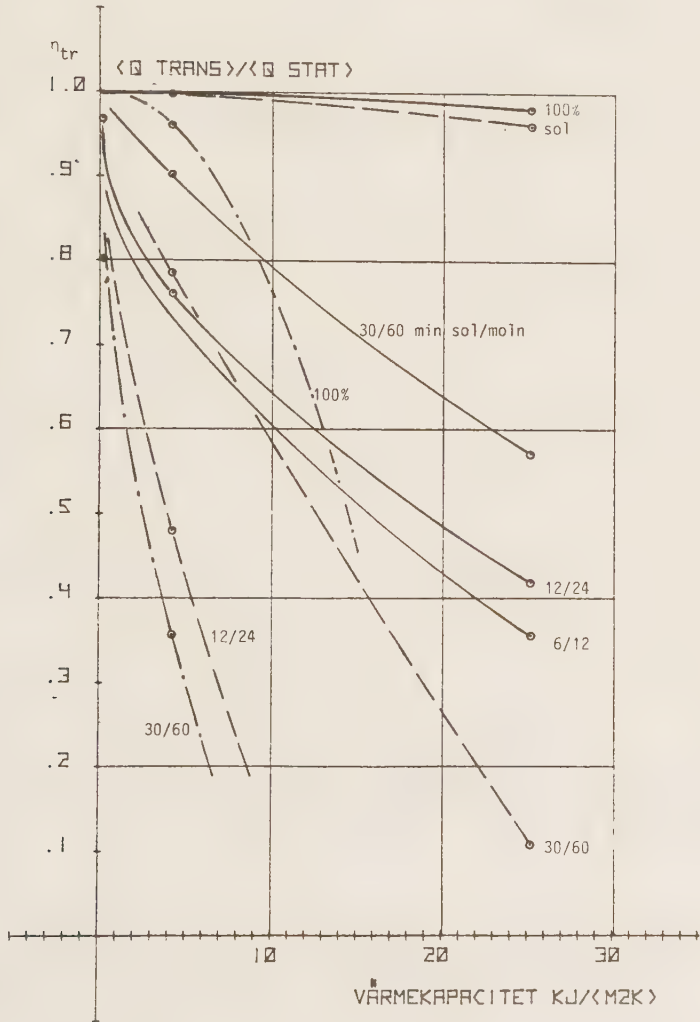
Samma som figur 8.6 men $\sigma_s = 33 \frac{1}{3} \%$.

Kurvorna för 100% sol redovisar en tredjedel av energiutbytet vid en hel dags solsken.



Figur 8.9

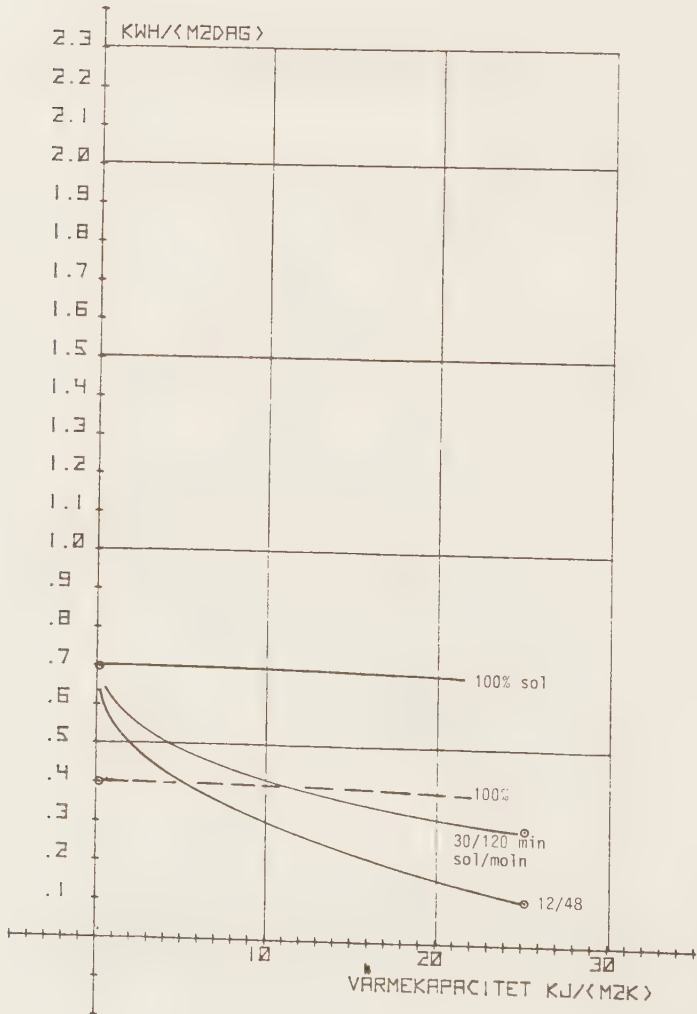
Transientverkningsgraden för solfångare enligt figur 8.8.



Figur 8.10

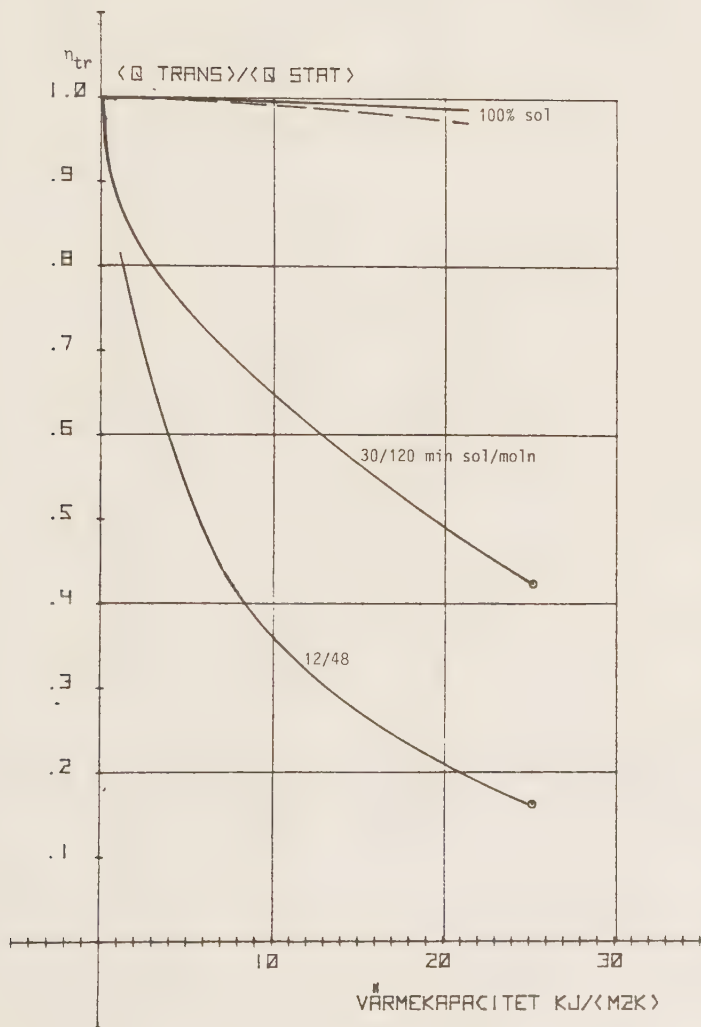
Samma som figur 8.6 men $\sigma_s = 20\%$.

Kurvorna för 100% sol redovisar en femtedel av energiutbytet vid en hel dags solsken.



Figur 8.11

Transientverkningsgraden för solfångare enligt figur 8.10.



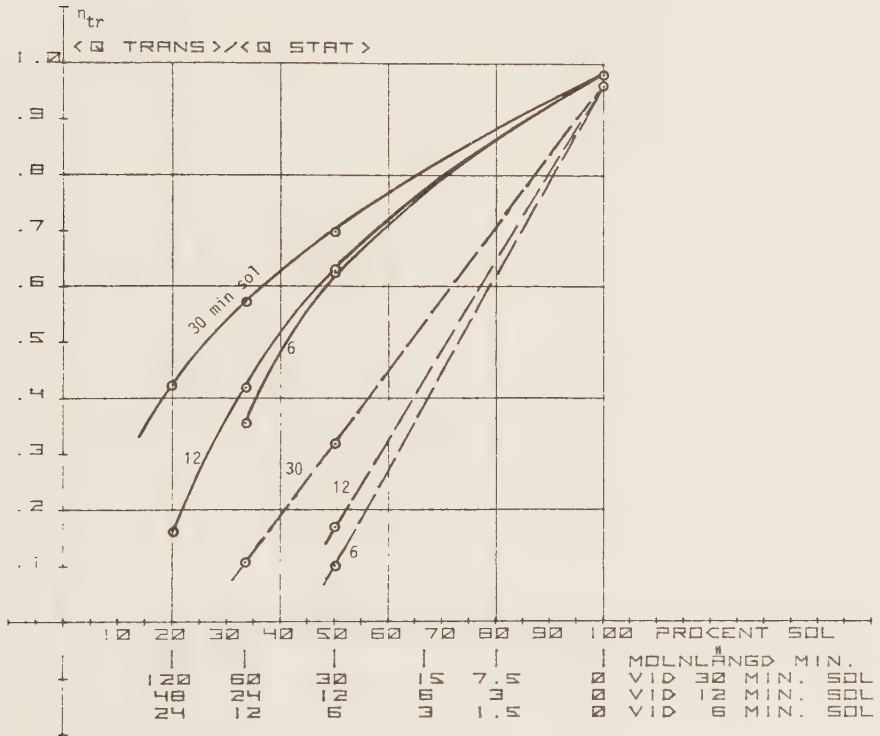
Figur 8.12

Transientverkningsgraden vid varierande solandel för solfångare vid följande data:

$$U_{L_0} = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}, (\tau\alpha) = 0,8, C_c = 25,12 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}, T_i = 50^\circ\text{C}, \\ \gamma = 45^\circ, \phi = 56^\circ(\text{Lund}), G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}. T_{\text{start}} = 55^\circ\text{C}.$$

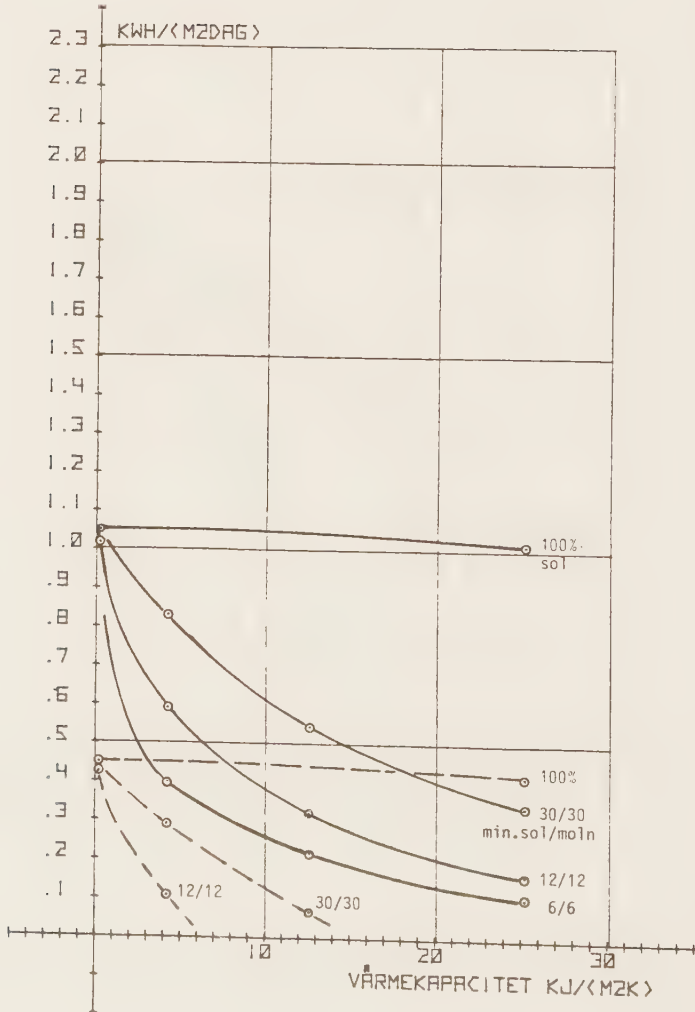
_____ = dag 174

----- = dag 87



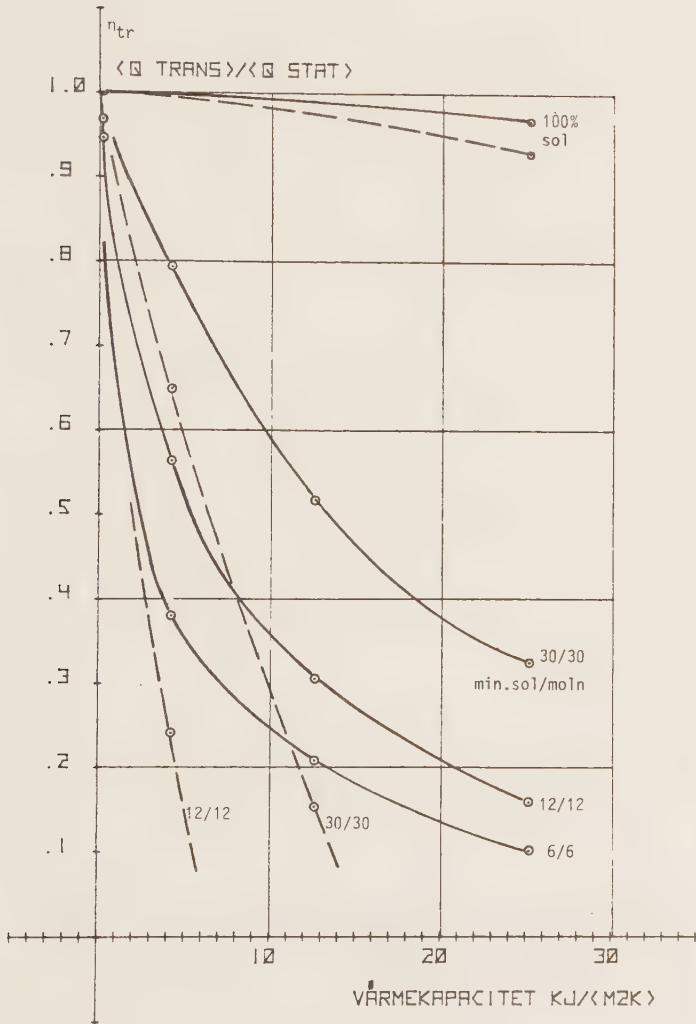
Figur 8.13

Samme som figur 8.6 men $T_i = 70^{\circ}\text{C}$.

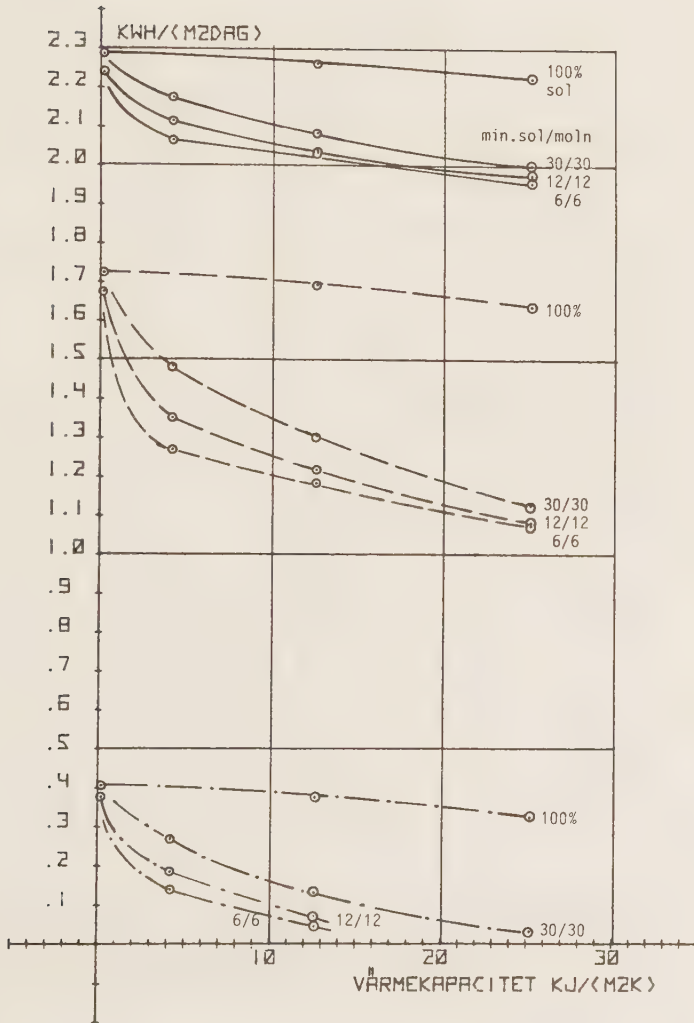


Figur 8.14

Transientverkningsgraden för solfångare enligt figur 8.13.



Figur 8.16 Samma som figur 8.6 men $U_{L_0} = 3 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.



Figur 8.15

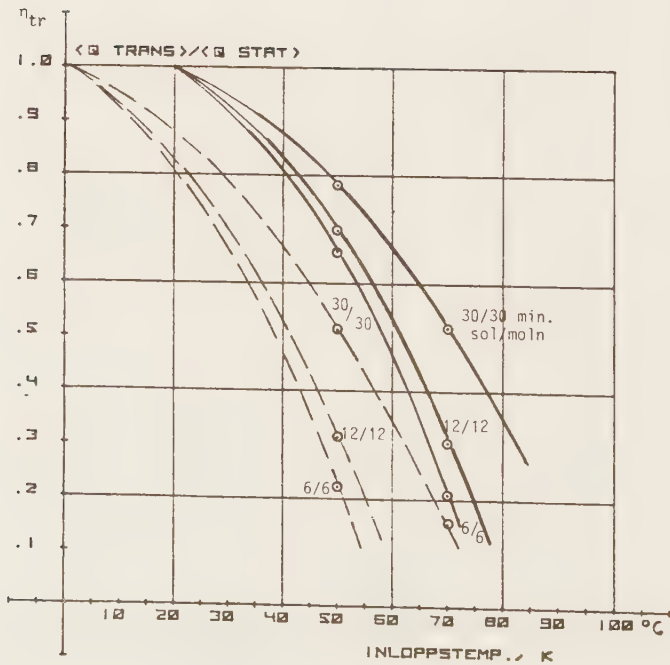
Transientverkningsgraden vid varierande inloppstemperatur för solfångare vid följande data:

$$U_{L0} = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}, (\tau\alpha) = 0,8, C_c = 12,56 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}, \gamma = 45^\circ,$$

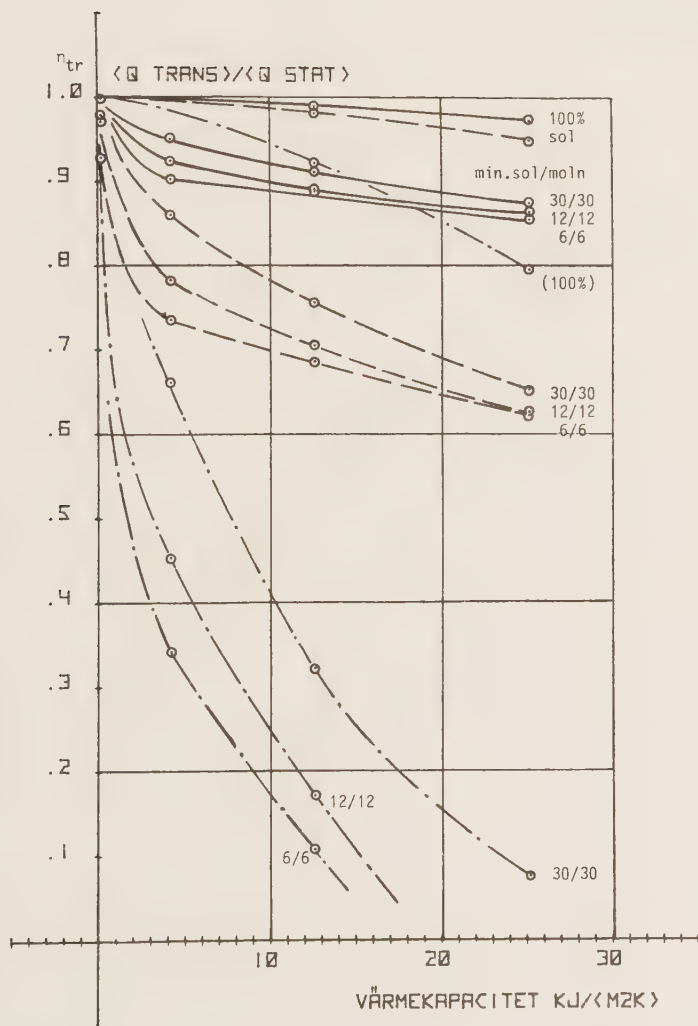
$$\phi = 56^\circ(\text{Lund}), \sigma_s = 50\%, G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}.$$

————— = dag 174; $\bar{T}_a = +20^\circ\text{C}$

----- = dag 87; $\bar{T}_a = +1^\circ\text{C}$



Figur 8.17 Transientverkningsgraden för solfångare enligt figur 8.16.



Figur 8.18

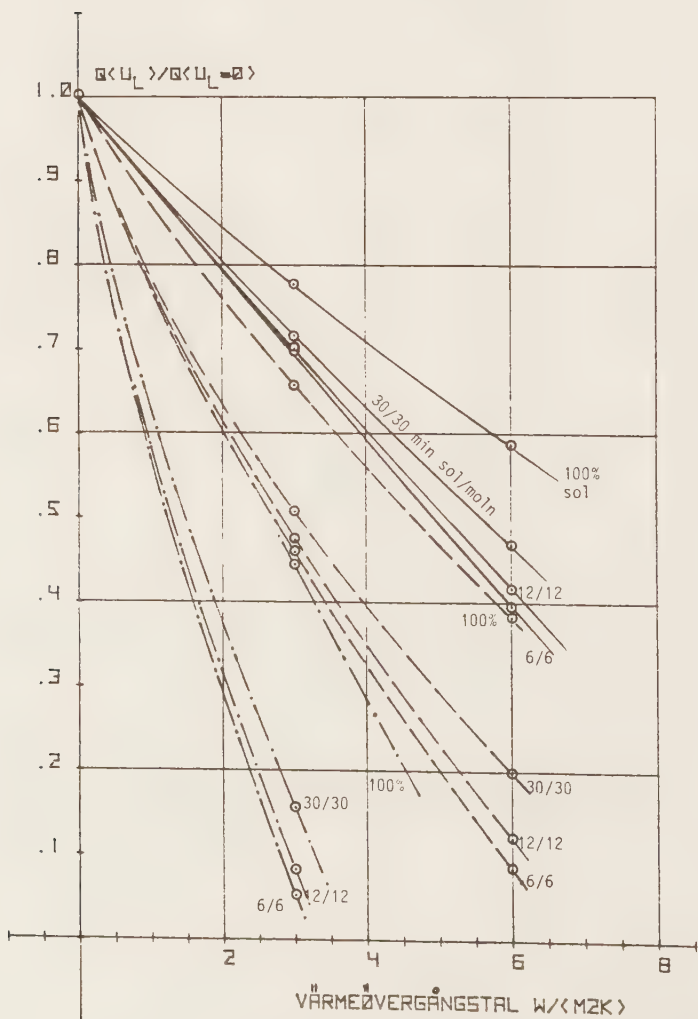
Relativa energiutbytet vid varierende värmeövergångstal U_{L0} för solfångare vid följande data:

$C_c = 12,56 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$, $(\tau\alpha) = 0,8$, $T_i = 50^\circ\text{C}$, $\sigma_s = 50\%$, $\gamma = 45^\circ$,
 $\phi = 56^\circ$ (Lund), $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$. $T_{\text{start}} = 55^\circ\text{C}$.

———— = dag 174

----- = dag 87

-.-.-.-.- = dag 348



Tabell 8.10 visar hur en nedsmutsning som reducerar en solfångares transmissionskoefficient med 10%, reducerar den uttagbara energin med 18,5% vid 100% sol och 50°C magasinstemperatur och med 22,8% vid omväxlande 30 minuter sol och 30 minuter moln. Vid 70°C magasinstemperatur blev motsvarande värden 26,0 resp. 38,9%. Värdena gäller för dag nr 174. Vid kortare dagar förorsakar försmutsningen procentuellt ännu större förluster.

Beräkningarna kan också sammanställas för att visa hur en ändring i $(\tau\alpha)$ ändrar transientverkningsgraden. För de i tabell 8.10 redovisade förhållandena blir vid 50°C magasinstemperatur, $(\tau\alpha) = 0,80$ och vid 30/30 minuters solperiodicitet transientverkningsgraden 78,2%. Ändras $(\tau\alpha)$ till 0,72 sjunker transientverkningsgraden till 74,9%, dvs med 4,2%, medan totala energiminskningen blir $100 - 81,3 = 18,7\%$.

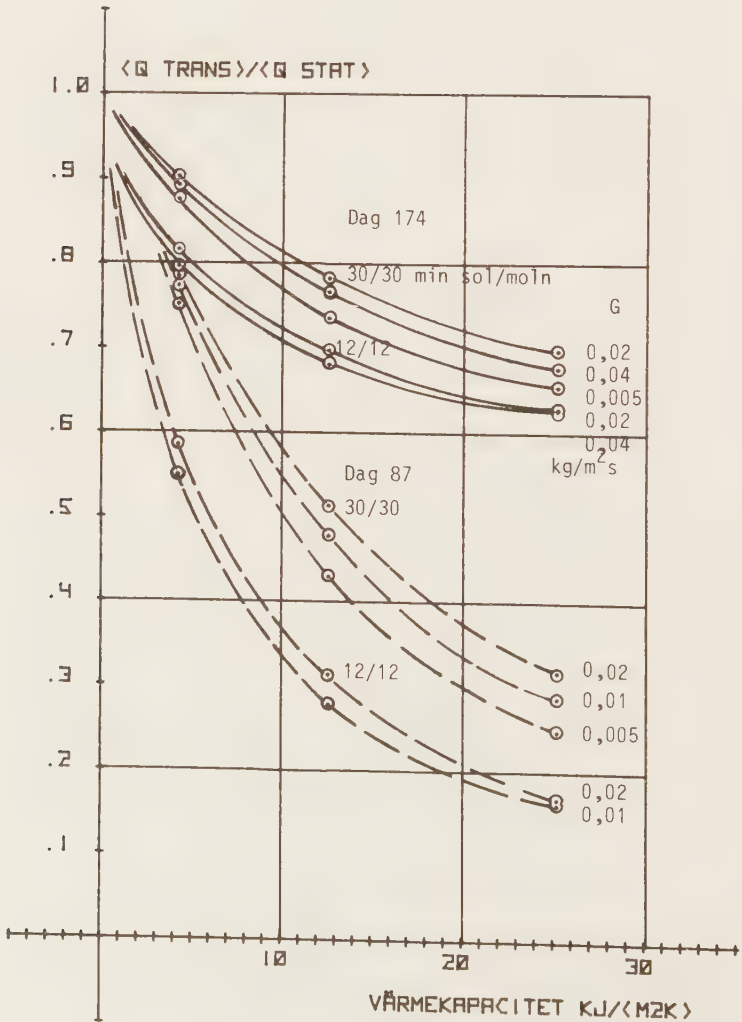
Figur 8.19 visar transientverkningsgraden för en del av fallen i figur 8.7, men dessutom vid olika massflöden genom solfångaren. Härav framgår att transientverkningsgraden sjunker med minskande massflöde. Detta framgår också av figur 8.20, som visar transientverkningsgraden som funktion av massflöde för en solfångare med effektiv värmekapacitet $C_c = 12,56 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$. Abscissan i diagrammet

gäller även för $G(1 - \frac{F_R}{F_T})(1 - F_R)^{-1}$, varför diagrammet även visar inflytandet av ändring i F' och/eller F_R om uttrycket inom klammer beräknas. I figur 8.21 visas detta uttryck som funktion av F' vid två olika värden på U_L . Därav kan man utläsa, att om man ändrar en solfångarkonstruktion så att F' minskar från 1 till 0,96 men U_{L_0} bibehålles oförändrat vid 6,0, sjunker uttrycket inom parentes från 1 till 0,5. Detta innebär, att konstruktionsändringen påverkar transientverkningsgraden lika mycket som en minskning av massflödet från 0,02 till 0,01 kg/(m²s) när F' är 1.

Är F' ej lika med 1, innebär en ändring av massflödet att även

$(1 - \frac{F_R}{F_T})(1 - F_R)^{-1}$ ändrar sig, eftersom F_R är en funktion av G enligt ekvation (3.2), ($G = \dot{m}/A_c$.) Sambandet åskådliggöres i figur 8.22 för solfångare med $U_{L_0} = 6,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ och vid $T_i = 50^\circ\text{C}$. Vid t ex

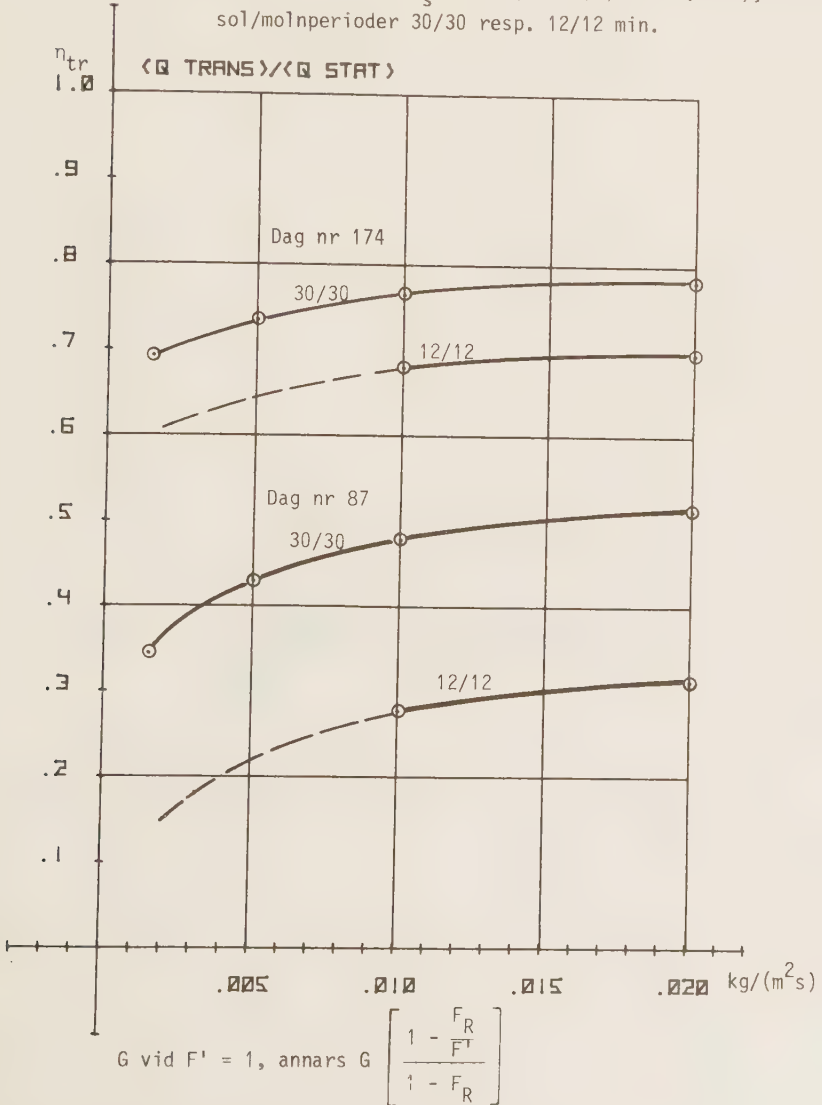
Figur 8.19 Transientverkningsgraden för solfångare.
Samma som figur 8.7 men dessutom vid andra massflöden.



Figur 8.20

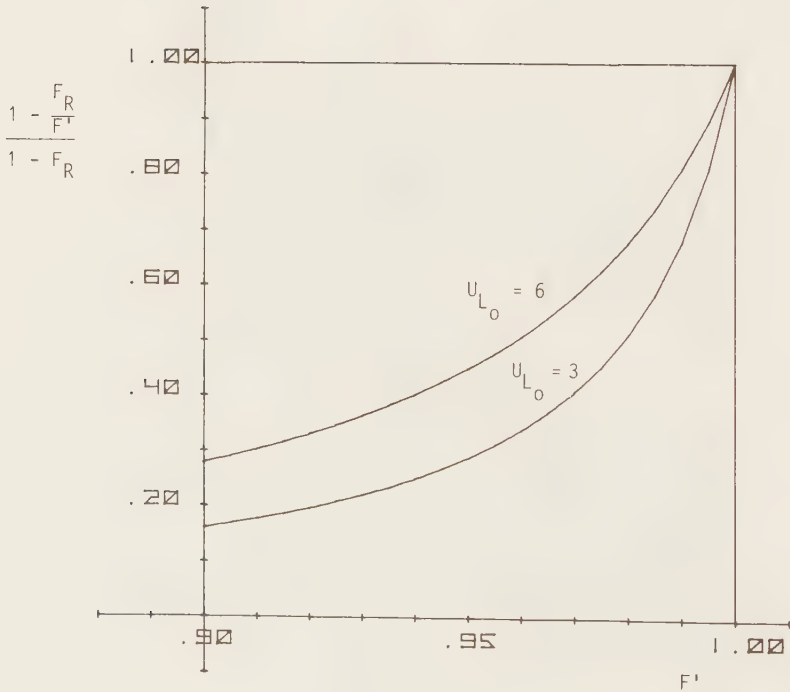
Transientverkningsgraden som funktion av massflödet G vid $F' = 1$, resp. som funktion av produkten $G(1 - \frac{F_R}{F'}) (1 - F_R)^{-1}$ för solfångare vid

dag nr 87 resp. 174, $C_c = 12,56 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$, $U_L = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $T_i = 50^\circ\text{C}$
 Starttemp = 55°C , $(\tau\alpha) = 0,8$, $\sigma_s = 50\%$, $\gamma = 450^\circ$, $\phi = 56^\circ$ (Lund),
 sol/molnperioder 30/30 resp. 12/12 min.

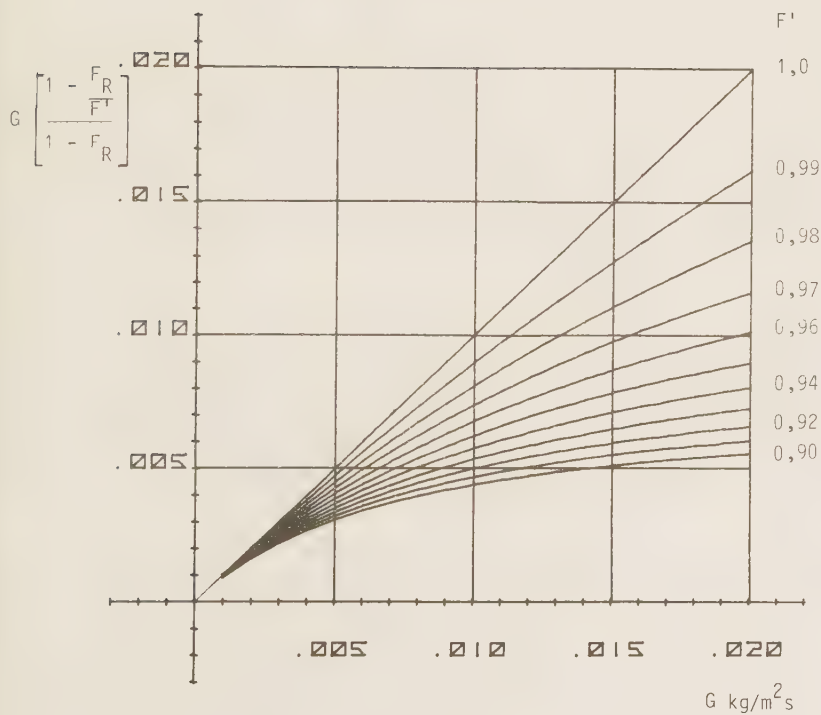


Figur 8.21 Uttrycket $(1 - \frac{F_R}{F_T})(1 - F_R)^{-1}$ som funktion av F' för solfångare med följande data:
 $G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$, $T_i = 50^\circ\text{C}$, $U_{L_0} = 3$ resp. $6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

$$U_L = U_{L_0} \cdot \frac{T_i + 273}{273}, \quad F_R \text{ enligt ekvation (3.8).}$$



Figur 8.22 Produktion $G(1 - \frac{F_R}{F_T})(1 - F_R)^{-1}$ som funktion av massflödet $\dot{m}$ vid varierande värde på F' . $U_{L0} = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $T_i = 50^\circ\text{C}$.



$G = 0,010 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ och $F' = 0,98$ ger figur 8.22 värdet 0,008, vilket används som ingångsvärde i figur 8.20 för uttagning av transientverkningsgraden.

För att förhindra upprepade till- och frånslagningar av cirkulationspumpen, låter man solfångaretemperaturen stiga några grader över inloppstemperaturen innan pumpen startar (15). I USA låter man denna övertemperatur vara 10 å 20 K. För att belysa övertemperaturens inverkan på den uttagbara energin, har energimängden för en dag som funktion av övertemperaturen beräknats för en solfångare vid ett visst sol/molnförhållande. Som framgår av tabell 8.9 och figur 8.23 avtar den uttagbara energimängden betydligt vid ökande övertemperatur.

När effektiva värmekapaciteten i solfångaren ökar, tar det längre tid innan solfångaren startar när solen är framme, resp. längre tid innan den stoppar när solen gått ned eller gått i moln. Eftersom det inte bara är solintensiteten som ändrar sig under dagen utan även utetemperaturen, T_a , är det två parametrar som samtidigt har ändrat sig vid jämförelserna.

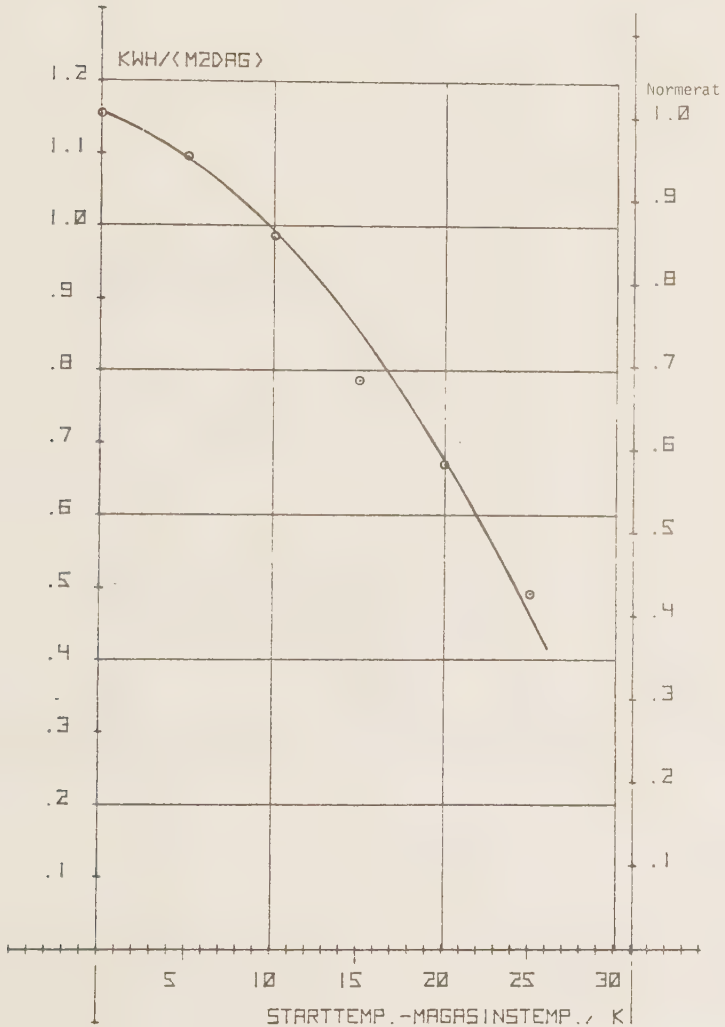
För att eliminera den ena parametern har beräkningar gjorts med antagandet att utetemperaturen, T_a är konstant $+20^\circ\text{C}$ under dagen (se tabell 8.8). Även i detta fall visar det sig, att den uttagbara energimängden under dagen, och därmed även transientverkningsgraden, avtar med stigande effektiv värmekapacitet i solfångaren.

I figur 8.24 redovisas den uttagbara energimängden per dag som funktion av dag på året, dels för en solfångare med termiska massan = 0 och 50% sol, dels för en solfångare med effektiva termiska massan = $25,12 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ och vid 30/30 minuter sol/molnförhållande. Ytorna mellan abscissan och respektive kurva är ett mått på under året insamlad energimängd. Hade skillnaden mellan övre och undre kurvan varit konstant, hade ytorna varit kongruenta och då hade följande likhet gällt:

Figur 8.23

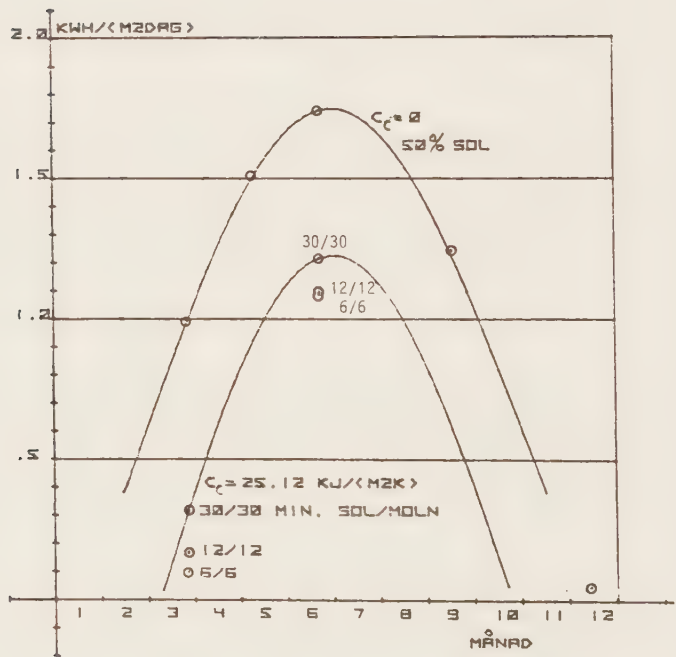
Energiutbytet vid varierande övertemperatur vid pumpstart för solfångare vid följande data:

Dag = 174, $C_c = 25,12 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$, $U_{L_0} = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $(\tau\alpha) = 0,8$,
 $T_i = 50^\circ\text{C}$, $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$, 12/12 minuter sol/moln.



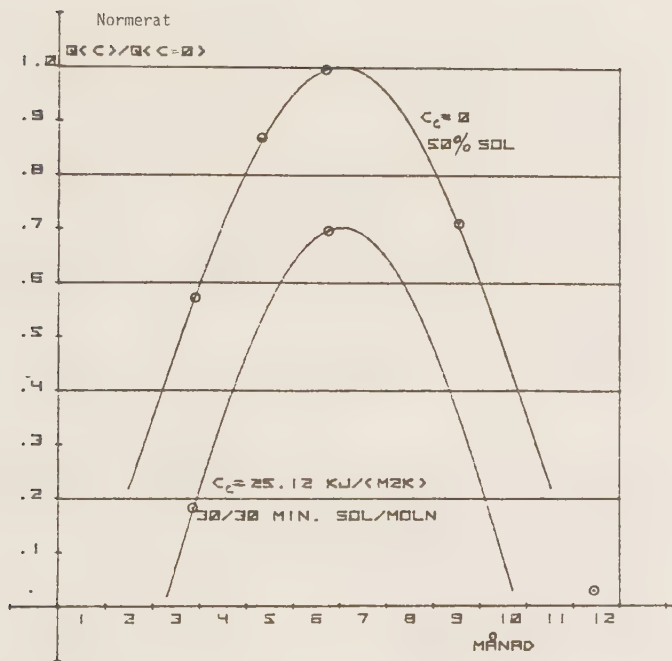
Figur 8.24

Energiutbytet i kWh/(m²dag) under året för solfångare vid $\gamma = 45^\circ$, $\phi = 56^\circ$ (Lund), $T_i = 50^\circ\text{C}$, $C_c = 0$ resp. $25,12 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$, $U_L = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $(\tau\alpha) = 0,8$, $G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$.



Figur 8.25

Samma som figur 8.24 men normerat. Utbytet bästa dag för solfångaren med $C_c = 0$ satt till 1.



$$\frac{Q_u(C) \text{ år}}{Q_u(C=0) \text{ år}} = \left[\frac{\hat{Q}_u(C)}{\hat{Q}_u(C=0)} \right]^2 \quad (8.62)$$

med $\hat{Q}_u$ = energimängden bästa dagen.

Nu är ytorna inte helt kongruenta, varför den transienta årsmedelverkningsgraden får beräknas, varvid gäller

$$\eta_{tr} \text{ år} = \frac{\sum_{d=1}^{365} Q_u(C)}{\sum_{d=1}^{365} Q_u(C=0)} < (\hat{\eta}_{tr})^2 \quad (8.63)$$

med $\hat{\eta}_{tr}$ = transientverkningsgraden bästa dagen.

I figur 8.25 har värdena enligt figur 8.24 normerats till $\hat{Q}_u(C)$ och därur kan för ifrågavarande solfångare direkt uttagas att

$$\eta_{tr} \text{ år} < 0,7^2$$

vilket gäller om sol/molnförhållandet hela året är 30/30 minuter.

En sammanfattning av ovanstående jämförelser visar, att om man varierar en parameter i taget och låter övriga vara konstanta, så avtar transientverkningsgraden med

- stigande effektiv värmekapacitet
- stigande U_L -värde
- avtagande $(\tau\alpha)$
- avtagande dagslängd
- avtagande sol/molnperiodlängd
- avtagande solandel under dagen
- stigande temperaturnivå i solfångare
- stigande övertemperatur vid pumptillslag
- avtagande massflöde G
- avtagande F'
- avtagande F_R

8.3.2.2 Vid varierande sol/molnintervall.

De i förra avsnittet framräknade transientverkningsgraderna, n_{tr} , är baserade på sol/molnfördelningar under dagen som inte existerar i verkligheten. Värdet i de konstlade fördelningarna ligger i att man inte behöver känna de verkliga fördelningarna för att kunna påvisa vilka faktorer som inverkar på den användbara energimängd som kan erhållas från en solfångare vid transienta förlopp.

Givetvis skulle det vara värdefullt om en genomsnittlig transientverkningsgrad kunde beräknas för en verklig dag. Eftersom förloppen ej är linjära, existerar ingen medeldag för vilken beräkningen kan ske. Blandar man slumpmässigt sol- och molnperioderna, som kan erhållas ur fördelningsekvationerna (30), och gör detta t ex 1000 gånger och beräknar den uttagbara energimängden för var och en av dessa 1000 dagar och tar medelvärdet av dessa, får man ett medelvärde som inte kan vara riktigt. Anledningen till detta är, att ett sådant medelvärde skulle förutsätta att det inte existerade något samband mellan två näraliggande solperioders längd. Ett samband måste dock rimligen finnas, eftersom växlingen mellan sol och moln bestäms av det för dagen aktuella vädret, vilket därigenom kommer att influera samtliga sol- och molnperioder under dagen.

Blandningen av sol- och molnperioder borde kunna ske med hjälp av någon statistisk modell. För att få klarhet i detta konsulterade jag Georg Lindgren (34) vid Institutionen för Matematisk Statistik vid Lunds Universitet. Efter en studie, utförd av Claes Jagrëus, kom man - med utgångspunkt från kapitel 6 - fram till att sol- och molnperioder kan beskrivas med hjälp av en process, där de enskilda periodlängderna har fördelningsekvationen

$$F_X(x) = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^a \quad (8.64)$$

och frekvensfunktionen

$$f_X(x) = ak^a x^{-(a+1)} \quad (8.65)$$

$$a > 0; \quad x \geq k > 0,$$

INSAMLAD ENERGI FÖR SOLFANGARE MED OLIKA EFFEKTIV VÄRMEKAPACITET, C_c ,
OCH VID GYNNSAM RESP. OGYNNSAM INDELNING AV SOL- OCH MOLNPERIODER

Ort: Lund

Magasinstemp, $T_M = 50^{\circ}\text{C}$

Plan solfångare

Starttemperatur, $T_M + 5^{\circ}\text{C}$

Lutning: 45° , mot söder

$G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$

$(\tau\alpha) = 0,8$, $U_{L0} = 6,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Andel sol: 50% under dagen

Insamlad energimängd, kWh/(m ² dag), och i förhållande till energimängden vid värmekapaciteten C _c = 0.						Temperaturförlopp, se diagram i bilaga
C _c kJ/(m ² K)	Sol-moln-perioder enligt figur 8.26 - 8.29	Dag nr 87		Dag nr 174		
		kWh	%	kWh	%	
0,21	Ogynnsammaste indelning	0,558	100%	0,212	100%	12
4,12	= 41,7% sol dag nr 87	0,503	90,1	0,119	56,1	
12,56	= 29,7% sol dag nr 174	0,117	21	0,089	42	
25,12		0,046	8,2	0	0	
0,21	Gynnsammaste indelning	1,279	100%	2,651	100%	13
4,19	= 60,8% sol dag nr 87	1,154	90,2	2,608	98,4	
12,56	= 74,0% sol dag nr 174	1,032	80,7	2,539	95,8	
25,12		0,931	72,8	2,473	93,3	
0,21	100% sol	1,987		3,477		
25,12	100% sol	1,909		3,410		

och sambandet mellan successiva periodlängder X_t , X_{t+1} beskrivs av ekvationen

$$X_{t+1} = \alpha' X_t + k' + \varepsilon_{t+1} \quad (8.66)$$

där α' , k' är konstanter och ε_{t+1} är oberoende variabler.

Emellertid saknas tillräckligt statistiskt underlag för bestämning av konstanterna α' och k' . Jag har därför ej kunnat använda denna metod, utan istället förfarit på följande sätt.

Jag har för dag nr 87 och 174 valt ut fördelningsekvationer för sol- resp. molnperioder som legat i mitten vid mina mätningar. Dessa dagars sammansättning framgår av figurerna 8.26 - 8.29. Sol- och molnperioderna har jag blandat på två olika sätt - ett som är gynnsamt och ett som är ogynnsamt för solfångaren. För båda dessa dagar har temperaturförloppet, användbara energimängden samt transientverkningsgraden beräknats för solfångare med olika effektiv värmekapacitet. Se tabell 8.14, figur 8.30 - 8.31 och bilagorna 12 och 13.

Utgångsläget har varit att solen varit framme 50% under dagen. Vid den bästa fördelningen träffades solfångaren av 74,0% sol vid dag nr 174 och 60,8% vid dag nr 87. Vid den sämsta fördelningen blev motsvarande värden 29,7 resp. 41,2%. Anledningen till att det kunde bli så lågt värde för sommardagen beror på, att dagarna fick börja med den längsta solperioden. För sommardagen hann alltså solen lysa en längre tid, innan solen gick upp över solfångarens horisont.

För solfångaren enligt figur 8.12 har transientverkningsgraden vid "bästa" och "sämsta" sol/molnfördelning lagts in i figur 8.32. Dessa får anses representera ytterlighetsfall. För genomsnittsdagen kommer transientverkningsgraden att bli mindre än vid "bästa" och högre än vid "sämsta" sol/molnfördelning. Ett band har i figuren lagts in för vardera dagen (dag nr 87 resp. 174) som ett tänkbart medelvärdesområde.

Figur 8.26

Solförhållanden dag nr 87

Fördelningsekvation:

$$v = 52,784 \cdot \lambda^{-2,0}$$

Antal perioder

≤ 1,0 min = 53 st

> 1,0 min = 52 st

Periodernas medellängd:

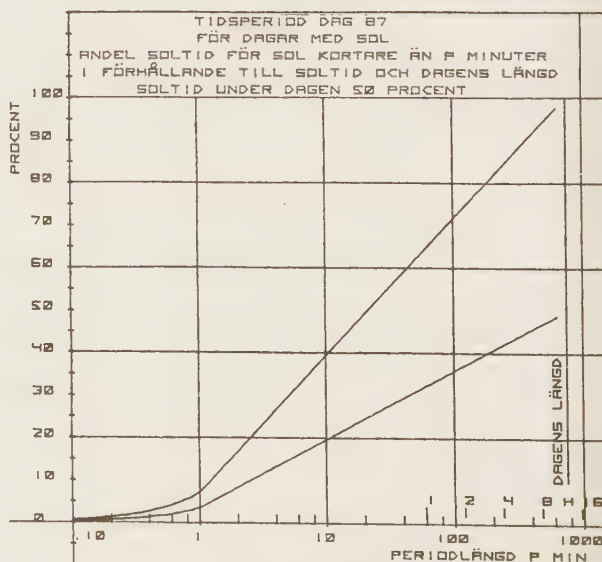
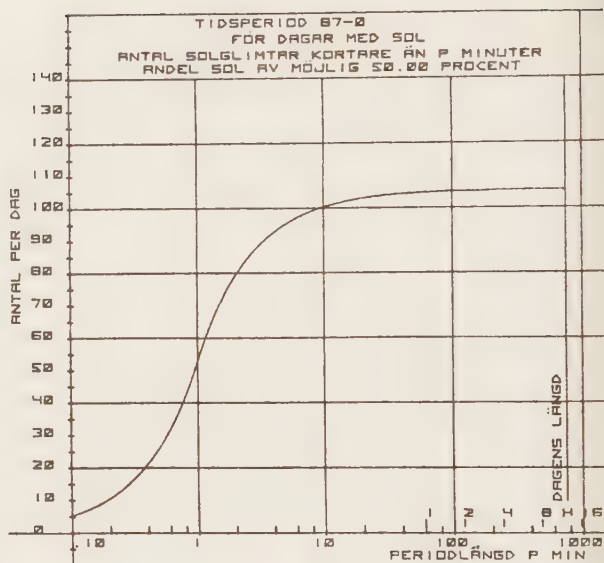
samtliga = 3,58 min

> 1,0 min = 6,72 min

Specifikation över perioder

> 1,0 min:

1.010	
1.029	
1.050	
1.071	2.008
1.093	2.088
1.116	2.174
1.140	2.267
1.166	2.369
1.192	2.480
1.220	2.603
1.248	2.738
1.279	2.888
1.310	3.055
1.344	3.242
1.379	3.455
1.416	3.697
1.455	3.975
1.496	4.299
1.540	4.681
1.586	5.137
1.635	5.691
1.687	6.380
1.743	7.258
1.803	8.418
1.866	10.019
1.935	12.378
	16.199
	23.491
	100.770



Figur 8.27

Molnförhållanden dag nr 87

Fördelningsekvation:

$$v = 16,480 \cdot \lambda^{-1,696}$$

Antal perioder

- ≤ 1,0 min = 81 st
- > 1,0 min = 23 st

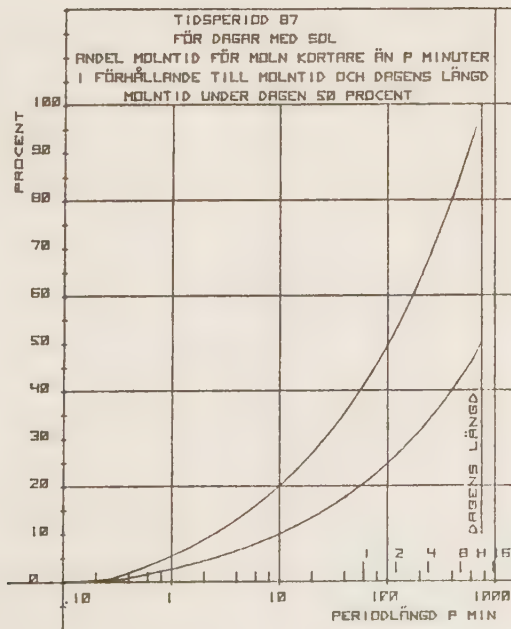
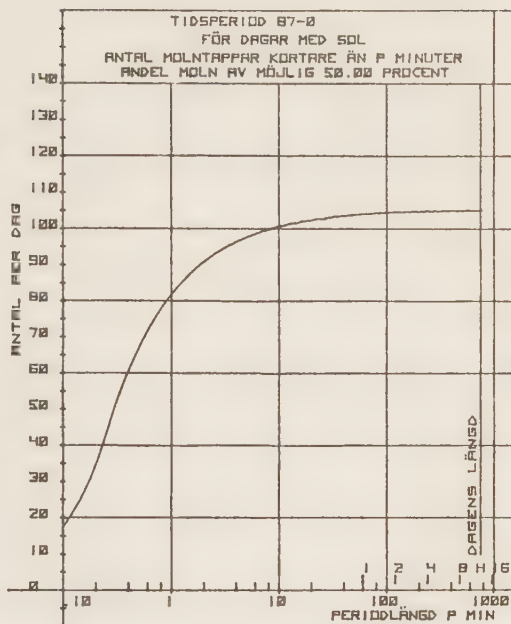
Periodernas medellängd

- samtliga = 3,56 min
- > 1,0 min = 14,80 min

Specifikation över perioder

> 1,0 min:

1.001
1.099
1.174
1.259
1.354
1.463
1.587
1.739
1.936
2.191
2.503
2.882
3.344
3.769
4.210
4.616
5.071
5.418
5.931
6.497
7.175
7.811
8.510



Figur 8.28

Solförhållanden dag nr 174

Fördelningsekvation:

$$v = 33,307 \cdot \lambda^{-1,8}$$

Antal perioder

≤ 1,0 min = 33 st
> 1,0 min = 41 st

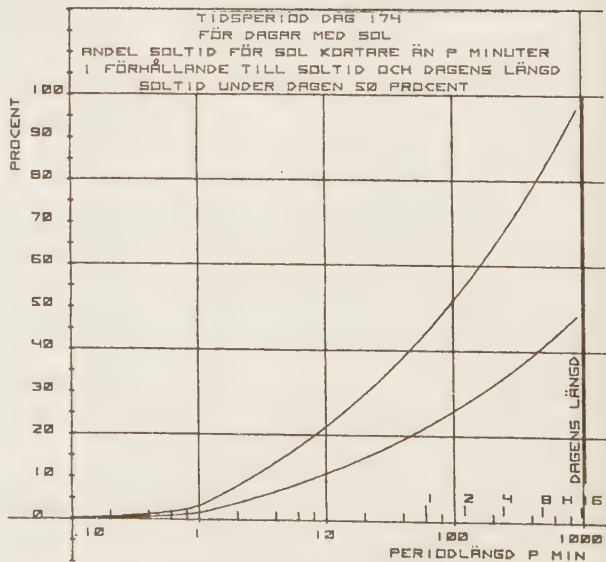
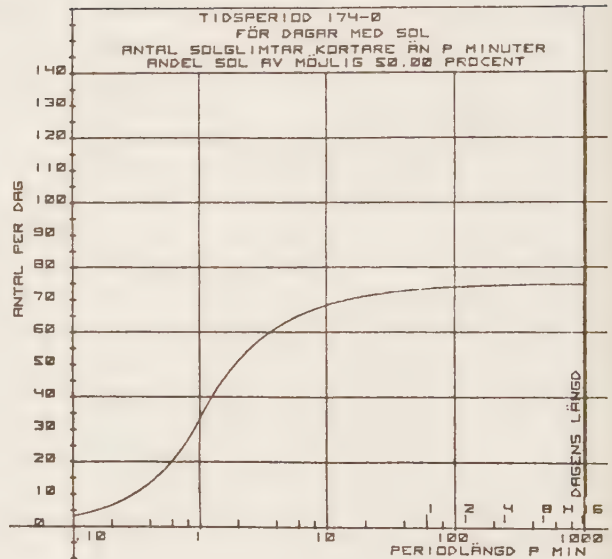
Periodernas medellängd

samtlige = 7,0 min
> 1,0 min = 12,22 min

Specifikation över perioder

> 1,0 min:

1.015	
1.047	
1.081	
1.116	
1.154	
1.194	
1.234	
1.281	
1.33	
1.392	
1.456	
1.496	
1.561	2.499
1.590	2.044
1.692	2.827
1.706	1.905
1.859	2.272
1.912	1.847
1.971	2.961
2.003	2.214
2.077	2.611
	2.005
	2.856
	2.610
	2.711
	2.041
	2.340
	2.147
	2.201
	2.011
	2.101
	2.111



Figur 8.29

Molnförhållanden dag nr 174

Fördelningsekvation:

$$v = 12,239 \cdot \lambda^{-1,583}$$

Antal perioder

$$\begin{aligned} \leq 1,0 \text{ min} &= 53 \text{ st} \\ > 1,0 \text{ min} &= 20 \text{ st} \end{aligned}$$

Periodernas medellängd

$$\begin{aligned} \text{samtliga} &= 6,96 \text{ min} \\ > 1,0 \text{ min} &= 23,97 \text{ min} \end{aligned}$$

Specifikation över perioder

> 1,0 min:

1.043
1.136
1.244
1.368
1.514
1.675
1.840
2.011
2.189
2.371
2.558
2.749
2.944
3.142
3.342
3.544
3.748
3.954
4.161
4.369
4.578
4.788
4.998
5.208
5.418
5.628
5.838
6.048
6.258
6.468
6.678
6.888
7.098
7.308
7.518
7.728
7.938
8.148
8.358
8.568
8.778
8.988
9.198
9.408
9.618
9.828
10.038
10.248
10.458
10.668
10.878
11.088
11.298
11.508
11.718
11.928
12.138
12.348
12.558
12.768
12.978
13.188
13.398
13.608
13.818
14.028
14.238
14.448
14.658
14.868
15.078
15.288
15.498
15.708
15.918
16.128
16.338
16.548
16.758
16.968
17.178
17.388
17.598
17.808
18.018
18.228
18.438
18.648
18.858
19.068
19.278
19.488
19.698
19.908
20.118
20.328
20.538
20.748
20.958
21.168
21.378
21.588
21.798
22.008
22.218
22.428
22.638
22.848
23.058
23.268
23.478
23.688
23.898
24.108
24.318
24.528
24.738
24.948
25.158
25.368
25.578
25.788
25.998
26.208
26.418
26.628
26.838
27.048
27.258
27.468
27.678
27.888
28.098
28.308
28.518
28.728
28.938
29.148
29.358
29.568
29.778
29.988
30.198
30.408
30.618
30.828
31.038
31.248
31.458
31.668
31.878
32.088
32.298
32.508
32.718
32.928
33.138
33.348
33.558
33.768
33.978
34.188
34.398
34.608
34.818
35.028
35.238
35.448
35.658
35.868
36.078
36.288
36.498
36.708
36.918
37.128
37.338
37.548
37.758
37.968
38.178
38.388
38.598
38.808
39.018
39.228
39.438
39.648
39.858
40.068
40.278
40.488
40.698
40.908
41.118
41.328
41.538
41.748
41.958
42.168
42.378
42.588
42.798
43.008
43.218
43.428
43.638
43.848
44.058
44.268
44.478
44.688
44.898
45.108
45.318
45.528
45.738
45.948
46.158
46.368
46.578
46.788
46.998
47.208
47.418
47.628
47.838
48.048
48.258
48.468
48.678
48.888
49.098
49.308
49.518
49.728
49.938
50.148
50.358
50.568
50.778
50.988
51.198
51.408
51.618
51.828
52.038
52.248
52.458
52.668
52.878
53.088
53.298
53.508
53.718
53.928
54.138
54.348
54.558
54.768
54.978
55.188
55.398
55.608
55.818
56.028
56.238
56.448
56.658
56.868
57.078
57.288
57.498
57.708
57.918
58.128
58.338
58.548
58.758
58.968
59.178
59.388
59.598
59.808
60.018
60.228
60.438
60.648
60.858
61.068
61.278
61.488
61.698
61.908
62.118
62.328
62.538
62.748
62.958
63.168
63.378
63.588
63.798
64.008
64.218
64.428
64.638
64.848
65.058
65.268
65.478
65.688
65.898
66.108
66.318
66.528
66.738
66.948
67.158
67.368
67.578
67.788
67.998
68.208
68.418
68.628
68.838
69.048
69.258
69.468
69.678
69.888
70.098
70.308
70.518
70.728
70.938
71.148
71.358
71.568
71.778
71.988
72.198
72.408
72.618
72.828
73.038
73.248
73.458
73.668
73.878
74.088
74.298
74.508
74.718
74.928
75.138
75.348
75.558
75.768
75.978
76.188
76.398
76.608
76.818
77.028
77.238
77.448
77.658
77.868
78.078
78.288
78.498
78.708
78.918
79.128
79.338
79.548
79.758
79.968
80.178
80.388
80.598
80.808
81.018
81.228
81.438
81.648
81.858
82.068
82.278
82.488
82.698
82.908
83.118
83.328
83.538
83.748
83.958
84.168
84.378
84.588
84.798
85.008
85.218
85.428
85.638
85.848
86.058
86.268
86.478
86.688
86.898
87.108
87.318
87.528
87.738
87.948
88.158
88.368
88.578
88.788
88.998
89.208
89.418
89.628
89.838
90.048
90.258
90.468
90.678
90.888
91.098
91.308
91.518
91.728
91.938
92.148
92.358
92.568
92.778
92.988
93.198
93.408
93.618
93.828
94.038
94.248
94.458
94.668
94.878
95.088
95.298
95.508
95.718
95.928
96.138
96.348
96.558
96.768
96.978
97.188
97.398
97.608
97.818
98.028
98.238
98.448
98.658
98.868
99.078
99.288
99.498
99.708
99.918
100.128
100.338
100.548
100.758
100.968
101.178
101.388
101.598
101.808
102.018
102.228
102.438
102.648
102.858
103.068
103.278
103.488
103.698
103.908
104.118
104.328
104.538
104.748
104.958
105.168
105.378
105.588
105.798
106.008
106.218
106.428
106.638
106.848
107.058
107.268
107.478
107.688
107.898
108.108
108.318
108.528
108.738
108.948
109.158
109.368
109.578
109.788
109.998
110.208
110.418
110.628
110.838
111.048
111.258
111.468
111.678
111.888
112.098
112.308
112.518
112.728
112.938
113.148
113.358
113.568
113.778
113.988
114.198
114.408
114.618
114.828
115.038
115.248
115.458
115.668
115.878
116.088
116.298
116.508
116.718
116.928
117.138
117.348
117.558
117.768
117.978
118.188
118.398
118.608
118.818
119.028
119.238
119.448
119.658
119.868
120.078
120.288
120.498
120.708
120.918
121.128
121.338
121.548
121.758
121.968
122.178
122.388
122.598
122.808
123.018
123.228
123.438
123.648
123.858
124.068
124.278
124.488
124.698
124.908
125.118
125.328
125.538
125.748
125.958
126.168
126.378
126.588
126.798
127.008
127.218
127.428
127.638
127.848
128.058
128.268
128.478
128.688
128.898
129.108
129.318
129.528
129.738
129.948
130.158
130.368
130.578
130.788
130.998
131.208
131.418
131.628
131.838
132.048
132.258
132.468
132.678
132.888
133.098
133.308
133.518
133.728
133.938
134.148
134.358
134.568
134.778
134.988
135.198
135.408
135.618
135.828
136.038
136.248
136.458
136.668
136.878
137.088
137.298
137.508
137.718
137.928
138.138
138.348
138.558
138.768
138.978
139.188
139.398
139.608
139.818
140.028
140.238
140.448
140.658
140.868
141.078
141.288
141.498
141.708
141.918
142.128
142.338
142.548
142.758
142.968
143.178
143.388
143.598
143.808
144.018
144.228
144.438
144.648
144.858
145.068
145.278
145.488
145.698
145.908
146.118
146.328
146.538
146.748
146.958
147.168
147.378
147.588
147.798
148.008
148.218
148.428
148.638
148.848
149.058
149.268
149.478
149.688
149.898
150.108
150.318
150.528
150.738
150.948
151.158
151.368
151.578
151.788
151.998
152.208
152.418
152.628
152.838
153.048
153.258
153.468
153.678
153.888
154.098
154.308
154.518
154.728
154.938
155.148
155.358
155.568
155.778
155.988
156.198
156.408
156.618
156.828
157.038
157.248
157.458
157.668
157.878
158.088
158.298
158.508
158.718
158.928
159.138
159.348
159.558
159.768
159.978
160.188
160.398
160.608
160.818
161.028
161.238
161.448
161.658
161.868
162.078
162.288
162.498
162.708
162.918
163.128
163.338
163.548
163.758
163.968
164.178
164.388
164.598
164.808
165.018
165.228
165.438
165.648
165.858
166.068
166.278
166.488
166.698
166.908
167.118
167.328
167.538
167.748
167.958
168.168
168.378
168.588
168.798
169.008
169.218
169.428
169.638
169.848
170.058
170.268
170.478
170.688
170.898
171.108
171.318
171.528
171.738
171.948
172.158
172.368
172.578
172.788
172.998
173.208
173.418
173.628
173.838
174.048
174.258
174.468
174.678
174.888
175.098
175.308
175.518
175.728
175.938
176.148
176.358
176.568
176.778
176.988
177.198
177.408
177.618
177.828
178.038
178.248
178.458
178.668
178.878
179.088
179.298
179.508
179.718
179.928
180.138
180.348
180.558
180.768
180.978
181.188
181.398
181.608
181.818
182.028
182.238
182.448
182.658
182.868
183.078
183.288
183.498
183.708
183.918
184.128
184.338
184.548
184.758
184.968
185.178
185.388
185.598
185.808
186.018
186.228
186.438
186.648
186.858
187.068
187.278
187.488
187.698
187.908
188.118
188.328
188.538
188.748
188.958
189.168
189.378
189.588
189.798
190.008
190.218
190.428
190.638
190.848
191.058
191.268
191.478
191.688
191.898
192.108
192.318
192.528
192.738
192.948
193.158
193.368
193.578
193.788
193.998
194.208
194.418
194.628
194.838
195.048
195.258
195.468
195.678
195.888
196.098
196.308
196.518
196.728
196.938
197.148
197.358
197.568
197.778
197.988
198.198
198.408
198.618
198.828
199.038
199.248
199.458
199.668
199.878
200.088
200.298
200.508
200.718
200.928
201.138
201.348
201.558
201.768
201.978
202.188
202.398
202.608
202.818
203.028
203.238
203.448
203.658
203.868
204.078
204.288
204.498
204.708
204.918
205.128
205.338
205.548
205.758
205.968
206.178
206.388
206.598
206.808
207.018
207.228
207.438
207.648
207.858
208.068
208.278
208.488
208.698
208.908
209.118
209.328
209.538
209.748
209.958
210.168
210.378
210.588
210.798
211.008
211.218
211.428
211.638
211.848
212.058
212.268
212.478
212.688
212.898
213.108
213.318
213.528
213.738
213.948
214.158
214.368
214.578
214.788
214.998
215.208
215.418
215.628
215.838
216.048
216.258
216.468
216.678
216.888
217.098
217.308
217.518
217.728
217.938
218.148
218.358
218.568
218.778
218.988
219.198
219.408
219.618
219.828
220.038
220.248
220.458
220.668
220.878
221.088
221.298
221.508
221.718
221.928
222.138
222.348
222.558
222.768
222.978
223.188
223.398
223.608
223.818
224.028
224.238
224.448
224.658
224.868
225.078
225.288
225.498
225.708
225.918
226.128
226.338
226.548
226.758
226.968
227.178
227.388
227.598
227.808
228.018
228.228
228.438
228.648
228.858
229.068
229.278
229.488
229.698
229.908
230.118
230.328
230.538
230.748
230.958
231.168
231.378
231.588
231.798
232.008
232.218
232.428
232.638
232.848
233.058
233.268
233.478
233.688
233.898
234.108
234.318
234.528
234.738
234.948
235.158
235.368
235.578
235.788
235.998
236.208
236.418
236.628
236.838
237.048
237.258
237.468
237.678
237.888
238.098
238.308
238.518
238.728
238.938
239.148
239.358
239.568
239.778
239.988
240.198
240.408
240.618
240.828
241.038
241.248
241.458
241.668
241.878
242.088
242.298
242.508
242.718
242.928
243.138
243.348
243.558
243.768
243.978
244.188
244.398
244.608
244.818
245.028
245.238
245.448
245.658
245.868
246.078
246.288
246.498
246.708
246.918
247.128
247.338
247.548
247.758
247.968
248.178
248.388
248.598
248.808
249.018
249.228
249.438
249.648
249.858
250.068
250.278
250.488
250.698
250.908
251.118
251.328
251.538
251.748
251.958
252.168
252.378
252.588
252.798
253.008
253.218
253.428
253.638
253.848
254.058
254.268
254.478
254.688
254.898
255.108
255.318
255.528
255.738
255.948
256.158
256.368
256.578
256.788
256.998
257.208
257.418
257.628
257.838
258.048
258.258
258.468
258.678
258.888
259.098
259.308
259.518
259.728
259.938
260.148
260.358
260.568
260.778
260.988
261.198
261.408
261.618
261.828
262.038
262.248
262.458
262.668
262.878
263.088
263.298
263.508
263.718
263.928
264.138
264.348
264.558
264.768
264.978
265.188
265.398
265.608
265.818
266.028
266.238
266.448
266.658
266.868
267.078
267.288
267.498
267.708
267.918
268.128
268.338
268.548
268.758
268.968
269.178
269.388
269.598
269.808
270.018
270.228
270.438
270.648
270.858
271.068
271.278
271.488
271.698
271.908
272.118
272.328
272.538
272.748
272.958
273.168
273.378
273.588
273.798
274.008
274.218
274.428
274.638
274.848
275.058
275.268
275.478
275.688
275.898
276.108
276.318
276.528
276.738
276.948
277.158
277.368
277.578
277.788
277.998
278.208
278.418
278.628
278.838
279.048
279.258
279.468
279.678
279.888
280.098
280.308
280.518
280.728
280.938
281.148
281.358
281.568
281.778
281.988
282.198
282.408
282.618
282.828
283.038
283.248
283.458
283.668
283.878
284.088
284.298
284.508
284.718
284.928
285.138
285.348
285.558
285.768
285.978
286.188
286.398
286.6

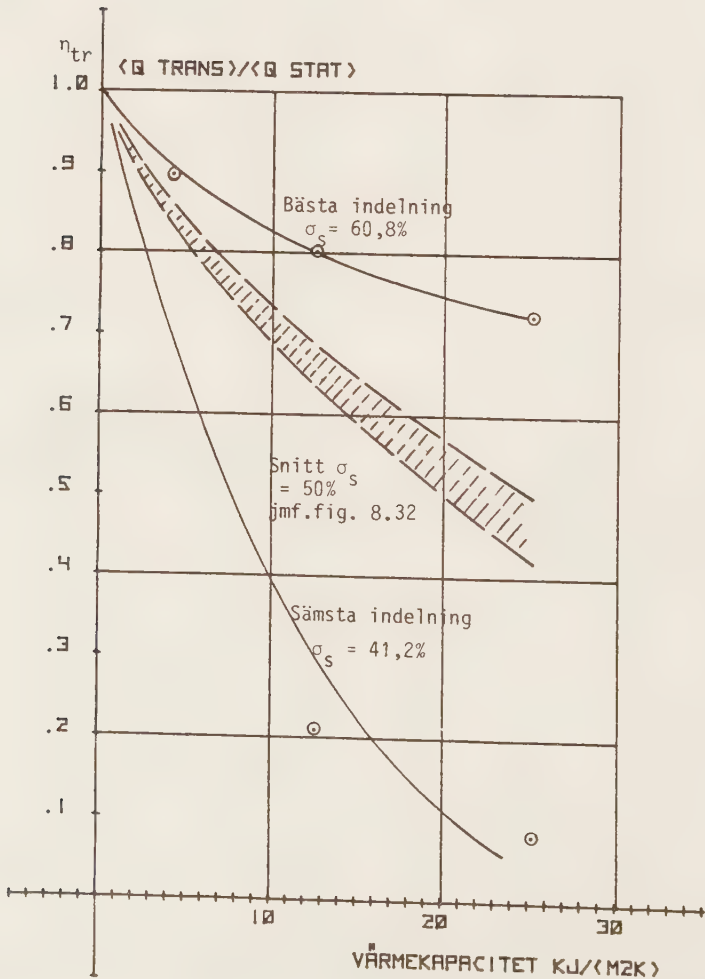
Figur 8.30

Transientverkningsgraden för solfångare vid varierande effektiv värmekapacitet och vid olika indelning av givna sol- och molnperioder och vid följande data:

Dag = 87, $U_{L0} = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $(\tau\alpha) = 0,8$, $T_i = 50^\circ\text{C}$, $\gamma = 45^\circ$,

$\phi = 56^\circ$ (Lund), $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$. $T_{\text{start}} = 55^\circ\text{C}$.

Solperioder enligt figur 8.26. Molnperioder enligt figur 8.27.
50% sol under dagen.



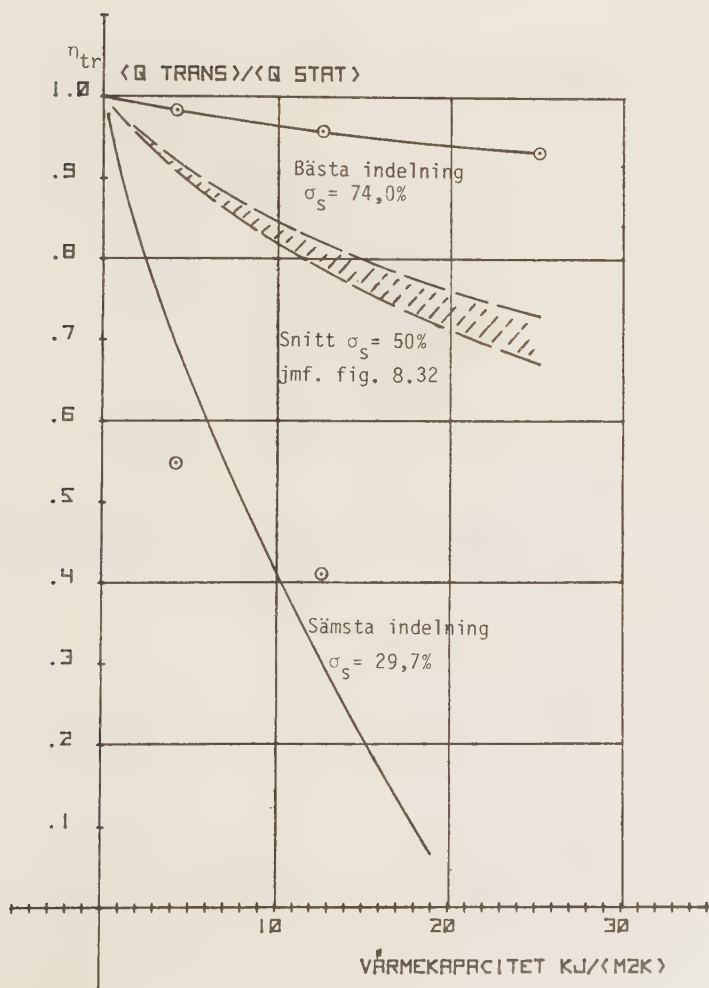
Figur 8.31

Transientverkningsgraden för solfångare vid varierande effektiv värmekapacitet och vid olika indelning av givna sol- och molnperioder och vid följande data:

Dag = 174, $U_{L0} = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $(\tau\alpha) = 0,8$, $T_i = 50^\circ\text{C}$, $\gamma = 45^\circ$,

$\phi = 56^\circ$ (Lund), $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$. $T_{\text{start}} = 55^\circ\text{C}$.

Solperioder enligt figur 8.26. Molnperioder enligt figur 8.27.
50% sol under dagen.

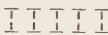


Figur 8.32

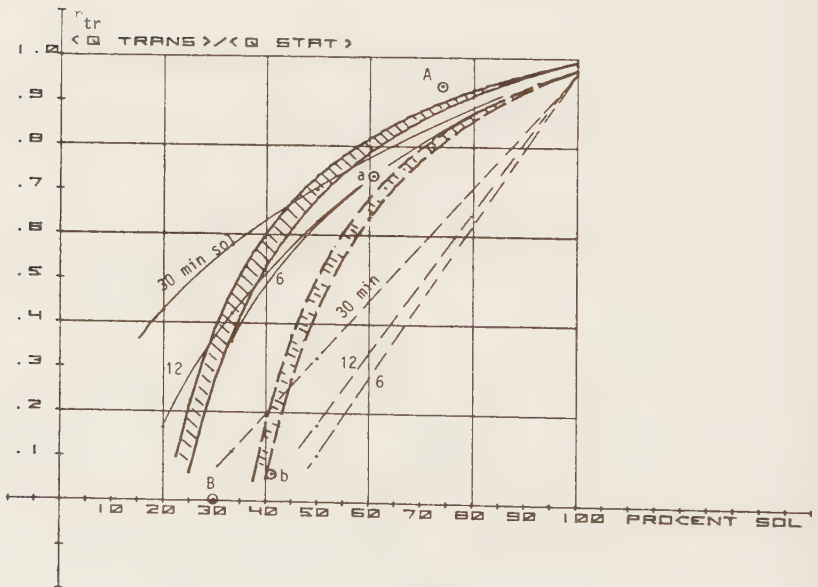
Transientverkningsgraden vid varierande solandel under samma förhållanden som figur 8.12, men dessutom vid "bästa" indelning för dag nr 174, Punkt A
 " " " " dag nr 87, " a
 vid "sämsta" indelning för dag nr 174, Punkt B
 " " " " dag nr 87, " b



snittvärde för dag nr 174



" " dag nr 87



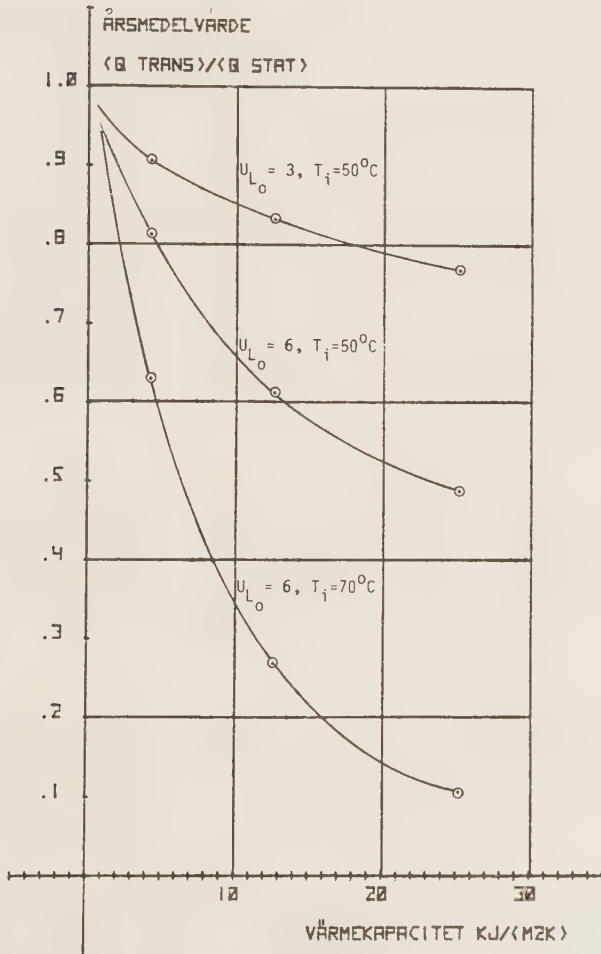
Figur 8.33

Förväntat årsmedelvärde av transientverkningsgraden vid varierande effektiv värmekapacitet hos solfångaren och vid 3 olika fall:

$U_{L0} = 3$ resp. $6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, ($\tau\alpha = 0,8$), $T_i = 50$ resp. 70°C ,

$\gamma = 45^\circ$, $\phi = 56^\circ$ (Lund), $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$.

$T_{\text{start}} = 55$ resp. 75°C .



Vid dag nr 174, som har solsannolikheten 50% i Lund, skär genomsnittsbandet vid 50% sol 30-minuterskurvan. Transientverkningsgraden, η_{tr} , beräknad med hjälp av fasta 30-minuters intervall av sol och moln, kan således gälla för "verkliga" dagar. Tills dess mer statistiskt material framkommer, får detta gälla som en hypotes. För andra orter torde det gå att på motsvarande sätt finna representativa längder på sol/molnperioderna.

Antar man att 30/30-minutersintervallen skulle vara representativa för alla solfångare, kan man med hjälp av transientverkningsgraden, beräknad efter dessa intervall för årets längsta dag, beräkna förväntat årsmedelvärde för η_{tr} enligt ekvation (8.62). Detta har gjorts för tre olika fall i figur 8.33.

8.3.3 Energitillskott och verkningsgrad enligt mätningar

Beräkningarna i föregående avsnitt visar, att energibortfallet på grund av solfångarnas transientegenskaper kan bli betydande, vilket återspeglas i låga transientverkningsgrader. Eftersom resultaten strider mot uppgifterna från USA, måste beräkningarna ställas mot mätningar gjorda i Skandinavien, som har andra väderförhållanden än USA.

I ref. (9) redogöres för 3 års driftserfarenheter från 6 olika solfångarekonstruktioner. Solfångarna har tillsammans 52 m^2 yta och är monterade på Dansk Kedelforenings kontorshus i Ålborg (lat. 57°). Man har mätt dels momentanverkningsgraden för var och en av solfångaretyperna, dels gemensamt upptagen energi som funktion av instrålad energi.

Vid en solinstrålning av 1 kW/m^2 , vid $48,7^\circ\text{C}$ temperatur på ingående vatten och vid ett massflöde av i genomsnitt $0,015 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ erhöles momentanverkningsgraderna 73,1, 63,4, 54,2, 44,8, 32,2 resp. 50.2%. Årsmedelverkningsgraden 1977 blev 17,9%.

Den högsta momentana verkningsgraden gäller för den enklaste solfångaren, som bestod av svartmålad värmeledningsradiator med ett täckglas. Vatteninnehållet var 6 l/m^2 . Figur 8.34 från ref. (9) visar instrålad och upptagen energi per vecka.

Författarens kommentar härtill är:

"Undersökningen visar att solfångarnas verkningsgrad är starkt beroende av solintensitetens variation, ty man kan få högst olika utbyte under två dagar med i övrigt lika stor solinstrålning, om solintensiteten den ena dagen är konstant och den andra dagen varierande på grund av växlande molnighet."

För att få fram konsekutiva kurvor och därigenom mer information har jag plottat upptagen energi som funktion av instrålad energi, figur 8.35, med data från figur 8.34.

Maximalt instrålad energi mot en yta vänd åt söder och lutande 60° mot horisontalplanet, har jag för en dag i vecka nr 38 beräknat till $6,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ dag})$. I figur 8.35 har lagts in kurvor genom maxipunkterna (B) och minimipunkterna (D), samt en kurva (C) för meridianvärdena. Kurvorna måste vid max-effekt sammanfalla - i detta fall på linjen för $6,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ dag})$. Dessutom har lagts in en kurva (A) gällande för en trolig effekt, om solfångarna inte hade någon värmekapacitet. Kurva B, C resp. D genom instrålad energi ger solfångarnas totalverkningsgrad, η_{tot} , som funktion av instrålad energi (figur 8.36). Samma kurvor genom kurva A ger solfångarnas transientverkningsgrad, η_{tr} , som funktion av instrålad energi (figur 8.37). η_{tot} genom η_{tr} ger η_{stat} . I detta fall med gjorda antaganden blir $\eta_{\text{stat}} = 28\%$ (oberoende av storleken på instrålad effekt). Eftersom den uppmätta totalverkningsgraden över året var $17,9\%$, blir den genomsnittliga transientverkningsgraden, $\eta_{\text{tr}} = 17,9/28 = 64\%$.

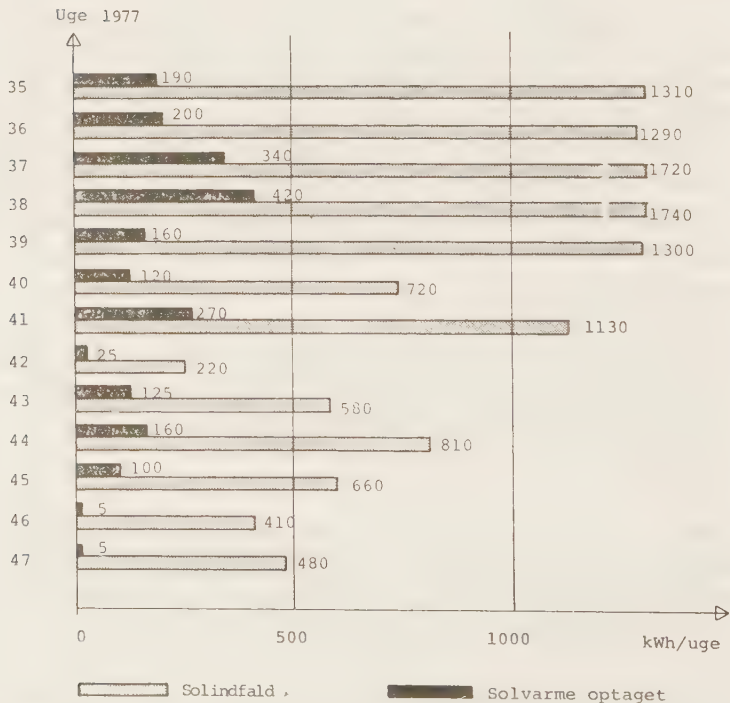
Spannet mellan högsta och lägsta verkningsgrad är betydande. Hade mätningarna skett under flera år hade spannet kanske blivit ännu större. I vilket fall som helst erfordras flera års mätningar för att möjliggöra beräkning av ett statistiskt medelvärde.

Även om figur 8.37 inte är helt jämförbar med figur 8.32, därför att den minskande instrålningen i figur 8.37 är en funktion av både ökad molnighet och kortare dag, så visar en jämförelse att transientverkningsgraden är av den storlek som framgår av de teoretiska beräkningarna. Jämförelsen visar också, att vid stor solandel ligger

η_{tr} över värdet för 30-minuterskurvan, medan vid liten solandel ligger η_{tr} under samma kurva. Eller med andra ord: vid stor solandel är solperioderna längre än 30 minuter och vid liten solandel är de kortare än 30 minuter.

Det framräknade årsmedelvärdet 64% på η_{tr} för de danska solfångarna ligger ungefär mitt i fältet på figur 8.33.

Figur 8.34 Veckovärden av solinstrålning och upptaget värme för solvärmeanläggning i Ålborg, Danmark (9).



Figur 8.35

Solfångarnas energiupptagning, som funktion av solinstrålning.

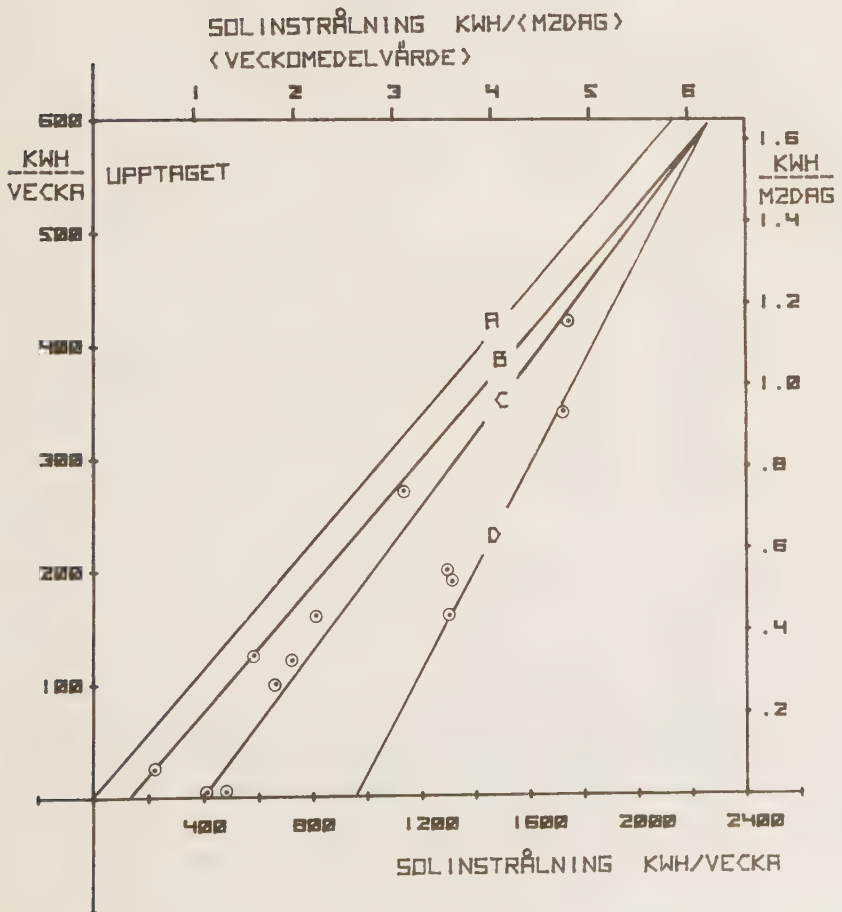
© Data enligt figur 8.34.

Kurva A: Uppskattat maximum om η_{tr} vore 1.

Kurva B: Max. uppmätt. Gynnsamma sol/molnförhållanden.

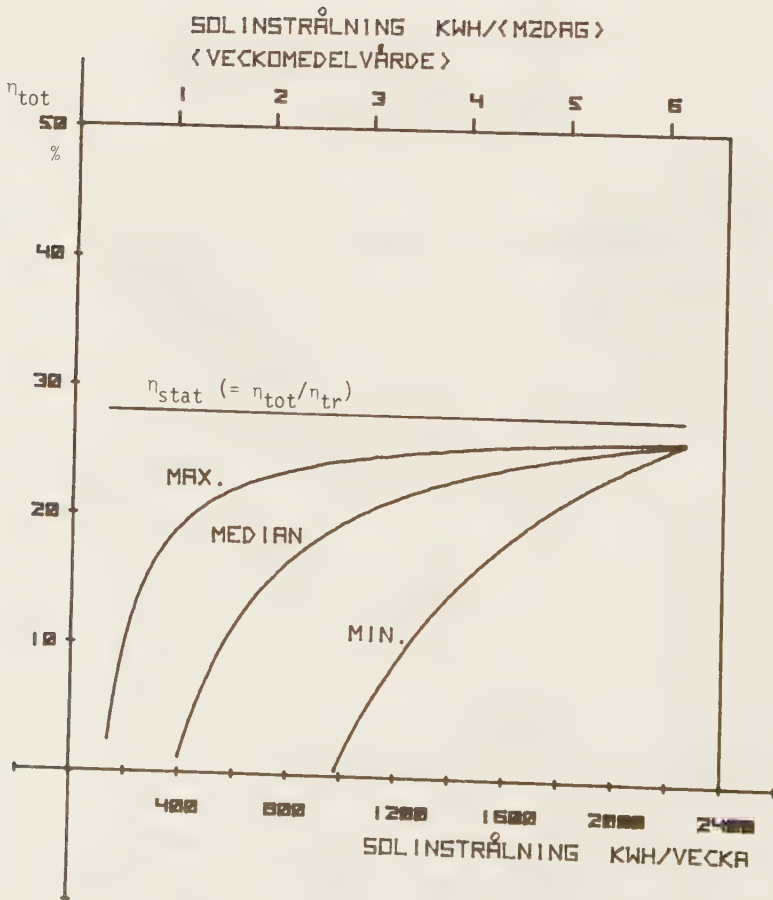
Kurva C: Medianvärde.

Kurva D: Min. uppmätt. Ogynnsamma sol/molnförhållanden.



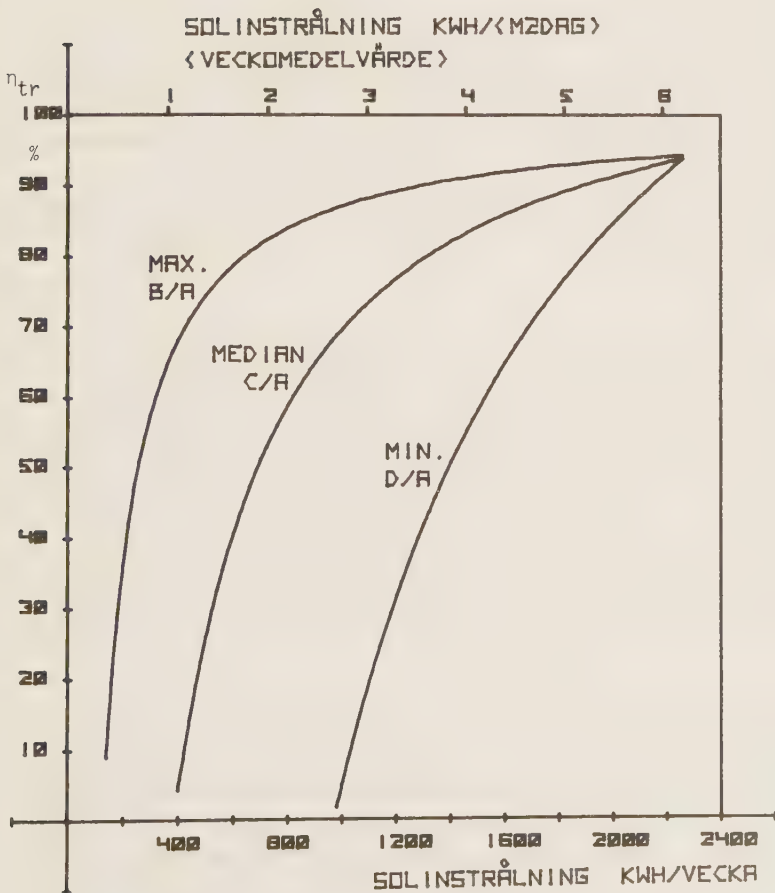
Figur 8.36

Totalverkningsgrad resp. statisk verkningsgrad för solfångare enligt figur 8.34 och 8.35.



Figur 8.37

Transientverkningsgrad för solfångare enligt figur 8.34 och 8.35, beräknad från data enligt figur 8.36.



9. SLUTSATSER OCH FÖRSLAG TILL YTTERLIGARE STUDIER

Den genomförda studien visar, att i klimat med växlande molnighet gäller ej den vedertagna uppfattningen, att en solfångares termiska massa är negligerbar vid beräkning av den energi som kan nyttiggöras i en solfångare. Tvärtom visar studien, att massan kan ha stor betydelse för solfångarens effektivitet.

En fråga man kan ställa sig är, om de gjorda avgränsningarna för studien påverkar slutsatsens allmängiltighet. Eftersom solfångarna karakteriseras av sina konstruktionsparametrar, anser jag att så inte är fallet. Självfallet gäller de för Lund framräknade värdena på transientverkningsgraden inte generellt, men beräkningsmetoderna är generella och gäller för alla solfångare och alla uppställningsorter. Detta innebär, att de parametrar som styr den plana solfångarens effektivitet, även styr t ex en koncentrerande solfångares effektivitet.

Det går inte att fastställa någon genomsnittlig transientverkningsgrad för någon ort förrän klimatdata med tillräcklig upplösning tagits fram. Dock anser jag, att liksom man accepterat att använda instrålningsdata som egentligen gäller för Helsingfors, kan man använda transientverkningsgrader som beräknats för Lund, åtminstone till dess bättre klimatunderlag föreligger. När så är fallet kan man beräkna transientverkningsgraden för godtycklig solfångare, med godtyckligt medium och med godtycklig placeringsort, genom att i ekvationerna sätta in aktuella värden på t ex konstruktions- och klimatparametrarna.

De mätningar som Statens Meteorologiska och Hydrologiska Institut (SMHI) påbörjat beträffande solintensitetens variation, kan förmodligen ligga till grund för transientberäkningar när mätningarna blir klara. Eftersom det kommer att dröja många år innan tillräcklig mängd data föreligger för att kunna beräkna statistiska medelvärden, skulle det vara önskvärt om SMHI kunde statistiskt bearbeta det material man redan har över klimatet för olika orter och ställa upp trendtabeller över sol- och molnperioder i likhet med vad som gjorts i kapitel 6, samt fastställa konstanterna i fördelningsekvation (8.64) eller i någon annan lämplig fördelningsekvation.

10. SAMMANFATTNING

Huvudproblemet i denna avhandling är transienta förlopp i solvärmeanläggningar. Problemet har tidigare endast i begränsad omfattning analyserats och torde, bl a för svenska förhållanden, ha största relevans då det gäller att korrekt uppskatta den energimängd som i olika solvärmeanläggningar kan nyttiggöras.

Vid studier av transienta förlopp i solvärmeanläggningar krävs uppgifter om momentanvärden på olika klimatparametrar. Timmedelvärdestatistik är ej användbar i detta sammanhang. Det för studierna erforderliga dataunderlaget baseras bl a på egna mätningar av sol- och molnperiodernas längd och frekvens i Lund under en tvåårsperiod och på mätningar av Lunelund av solintensiteten som funktion av solhöjd. Lunelunds data har bearbetats och en ekvation för intensiteten av direktstrålningen som funktion av tiden och ortens latitud har ställts upp.

Energiupplagringsförloppets dynamik studeras analytiskt, varvid solfångarens massa tänks förlagd till en punkt i absorberplåten. Solfångarens dynamiska beteende karakteriseras med hjälp av en tidskonstant, uttryckt med hjälp av solfångarparametrarnas massa gånger värmekapacitiveteten $(mC_p)_e$, värmeförlustkoefficienten (U_L) och värmeomvandlingsfaktorn (F_R) .

För solfångare med varierande värmekapacitet beräknas solfångartemperatur och användbar energi då solstrålningens dynamiska förlopp och andra relevanta parametrar varierar systematiskt.

Beräkningar visar, att vid pendlande instrålningens intensitet pendlar kollektortemperaturen kring ett medelvärde som bestäms av medelvärdet på instrålningens intensiteten oberoende av pendlingens frekvens. Detta innebär, att temperaturamplituden minskar då pendlingsfrekvensen ökar, vilket kan innebära att en solvärmeanläggning, som vid ett statistiskt betraktelsesätt skulle givit användbar energi, ej når upp till önskad temperatur i det dynamiska fallet.

En transientverkningsgrad, η_{tr} , införs som förhållandet mellan aktuell energi och energi som skulle erhållits, om solfångarens värmekapacitet vore 0.

Om solen lyser från morgon till kväll är η_{tr} nära 1 och är en mycket svag funktion av solfångarens värmekapacitet. Vid växlande sol och moln däremot, blir η_{tr} en stark funktion av värmekapaciteten. Dessutom avtar η_{tr} med alla funktioner eller parametrar som minskar den uttagbara effekten i det stationära fallet. Dvs η_{tr} avtar med stigande värmeförlustkoefficient, med avtagande transmissions-absorptions-produkt, avtagande dagslängd, avtagande andel sol under dagen, med stigande temperatur i solfångaren, etc.

Det visas, att årsmedelvärdet av transientverkningsgraden är mindre än kvadraten på transientverkningsgraden för årets längsta dag.

Genom att tillämpa ovan redovisade slutsatser på en från tidigare undersökningar oberoende mätserie avseende en solvärmeanläggning i Danmark framgår, att för en given anläggning varierar η_{tr} kraftigt med solintensitetens variation under dagen. För att ur detta stora spann få fram ett medelvärde fordras många års mätningar. Tills dess sådana föreligger, framförs som en hypotes, att $\bar{\eta}_{tr}$ (längsta dag) beräknas - åtminstone för Lund som har solsannolikheten 50% - som om dagen bestod av perioder av omväxlande 30 minuter sol och 30 minuter moln.

11. LITTERATURFÖRTECKNING/REFERENSLISTA

- 1 Adamson, Bo, Backman, Harry E.: Glas i hus, Esselte Studium AB.
- 2 Beard, J.T., Iachetta, F.A., Lilleleht, L.V., Huckstep, F.L., May, W.B.: Design and Operational Influences on Thermal Performance of "Solaris" Solar Collector, Journal of Engineering for Power, Oct. 1978, Vol. 100.
- 3 Bliss, Jr., Raymond, W.: The Derivations of Several "Plate-Efficiency Factors" Useful in the Design of Flat-Plate Solar Heat Collectors, Solar Energy, Vol. 3, pp. 55 - 64, (1959):4.
- 4 Borglin, Stig: Föreläsningar i "Solteknik" 1977-78 vid institutionen för Värme- och Kraftteknik, Lunds Tekniska Högskola.
- 5 Bossel, Ulf: Sonnenstand, Bestrahlungsdauer und Kosinusstunden für geneigte Flächen, Solentec Report SR-1, Solentec, Adelebsen, BRD.
- 6 Brown, Gösta, Isfält, Engelbrekt: Solinstrålning och solavskärmning, Rapport R19:1974, Statens Råd för Byggnadsforskning.
- 7 Close, D.J.: A Design Approach for Solar Processes, Solar Energy Journal, Vol. 11, pp. 112-122 (1967).
- 8 Collares-Pereira, H., and Rabl, A.: Derivation of Method for Predicting Long Term Average Energy Delivery of Solar Collectors, Solar Energy, Vol. 23, pp. 223-233 (1979).
- 9 Dansk Kedelforening: Solvarmeanlæg, 3 års driftserfaringer, Jan. 1980.
- 10 Duffie, John A., Beckman, William A.: Solar Energy Thermal Processes, John Wiley & Sons, New York 1974.

- 11 Ericsson, John: Omsolvärmens användande som mekanisk drifkraft, Acta Universitatis Lundensis, 1868.
- 12 Girdo, Valdis: Grundläggande förutsättningar för soluppvärmning av byggnader i Skandinavien, Rapport R108:1978, Statens Råd För Byggnadsforskning, Stockholm.
- 13 Hahne, E., Fisch, N., Arafa, A.: The Flat Plate Solar Collector. Its Steady-State and Transient State Behaviour, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, (International Symposium - Workshop on Solar Energy, June 1978, Cairo).
- 14 Hottel, H.C. och Whillier, A.: Evaluation of Flat-Plate Solar Collector Performance. Trans. of the Conference of the Use of Solar Energy, Vol. II, Thermal Processes, University of Arizona.
- 15 Kesselring, P.: Débit et critère d'enclenchement de la pompe d'un circuit de capteurs à eau chaude, Energie Solaire 3/79, 4/79.
- 16 Klein, S.A., Duffie, J.A., Beckman, W.A.: Transient Considerations of Flat-Plate Solar Collectors, Journal of Engineering for Power Transactions of the ASME, April 1974, pp. 109-113.
- 17 Klein, S.A.: Calculation of Flat-Plate Collector Loss Coefficients, Solar Energy, Vol. 17, pp. 79-80 (1975).
- 18 Klein, Sanford Alan: A Design Procedure for Solar Heating Systems, Ph.Dr thesis, 1976, University of Wisconsin-Madison.
- 19 Klein, S.A.: Calculation of Flat-Plate Collector Utilizability, Solar Energy, Vol. 21, pp. 393-402 (1978).
- 20 Klein, S.A. and Beckman, W.A.: A General Design Method for Closed-Loop Solar Energy Systems, Solar Energy, Vol. 22, pp. 269-282 (1979).

- 21 Lindgren, Georg: Institutionen för Matematisk Statistik, Lunds Universitet, personliga samtal.
- 22 Liu, Benjamin Y.H., Jordan, Richard C.: The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation, Solar Energy, Vol. 4, pp. 1-19 (1960):3.
- 23 Liu, Benjamin Y.H., Jordan, Richard C.: A Rational Procedure for Predicting the Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar-Energy Collectors, Solar Energy, Vol. 7, pp. 55-74 (1963):2.
- 24 Lodén, Kerstin, Liljekvist, Gösta H., Mathiessen, Olev: Astronomi och geofysik, Almqvist & Wiksell, Stockholm.
- 25 Lunelund, Harald: Värmestrålning och ljusstrålning i Finland, Acta Band XII (1936), Svenska Tekniska Vetenskapsakademien i Finland.
- 26 McWeigh, J.C.: Sun Power, An Introduction to the Applications of Solar Energy, Pergamon International Library.
- 27 Mattsson, Jan O.: Naturgeografiska Institutionen vid Lunds Universitet, personliga samtal.
- 28 Pleijel, Gunnar: Fönstrets värmebalans, Särtryck 3:1959, Statens Nämnd För Byggnadsforskning 1959, Stockholm.
- 29 Rabl, Ari: Yearly Average Performance of the Principal Solar Collector Types, Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado, SERI/TR-631-716, Jan. 1981.
- 30 Ransmark, S-E.: Mätning av sol- och månperioder i Lund 1979-1981. LTH, Institutionen för Värme- och Kraftteknik, 1982
- 31 Rapp, Donald, Hoffman, A.A.J.: On the Relation Between Insolation and Climatological Variables, Energy Conversion, Vol. 17, pp. 163-172.

- 32 Sayigh, A.A.M.: Solar Air Conditioning in a Hot Arid Climate, 2nd Miami International Conference on Alternative Energy Sources, 1979.
- 33 Smith, Charles C., Weiss, Thomas A.: Design Application of the Hottel-Willier-Bliss Equation, Solar Energy, Vol. 19, pp. 109-113 (1977).
- 34 Stickford, Jr., George, H.: An Averaging Technique for Predicting the Performance of a Solar Energy Collector System, Battelle Columbus Laboratories Columbus, Ohio. (Sharing the Sun! Solar Energy Conference Winnipeg, Canada, Aug. 1976.)
- 35 Swanson, S.R., Boehm, R.F.: Calculation of Long Term Solar Collector Heating System Performance, Solar Energy, Vol. 19, pp. 129-138 (1977).
- 36 Taesler, Roger: Klimatdata för Sverige, Statens Institut För Byggnadsforskning 1972, Stockholm.
- 37 Thekaekara, M.P.: Solar Energy Outside the Earth's Atmosphere, Solar Energy, Vol. 14, pp. 109-127 (1973).

BILAGA

Ett urval av de diagram som plottats samtidigt med beräkningarna i kapitel 8.

Enligt den använda beräkningsmodellen är temperaturen densamma överallt i solfångaren så länge pumpen inte går. Det är denna medeltemperatur som redovisas i diagrammen. När pumpen går, varierar temperaturen inom solfångaren. Den redovisade temperaturen i dessa fall är utloppstemperaturen.

Ort: Lund

Plan solfångare

Lutning: 45° mot söder

$(\alpha) = 0,8$ $U_{L0} = 6,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Värme kapacitet, $C_c = 0,2 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$

Tidskonstant, $\tau_0 = 10^3 C_c U_{L0}^{-1} = 35 \text{ sek.}$

Magasinstemperatur, $T_M = 50^\circ\text{C}$

Starttemperatur = $T_M + 50^\circ\text{C}$

Fluid: Vatten, $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$

Solperioder/molnperioder: 100%/0

Solandel: 50%

Dag nr	87	174	348
Insamlad energimängd	1,987/2	3,477/2	0,101/2
	kWh/(m ² dag)		

BILAGA 1

D-174

D-87

D-348

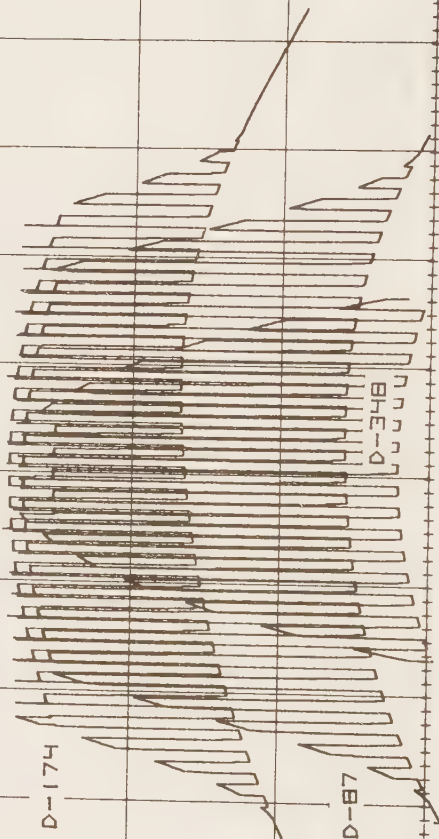
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 KLOCKAN

BILAGA 2

Ort: Lund
 Plan solfångare
 Lutning: 45° mot söder
 $(\tau_a) = 0,8$ $U_{L_0} = 6,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 Värmekapacitet, $C_c = 0,2 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$
 Tidskonstant, $\tau_0 = 10^3 C_c U_{L_0}^{-1} = 35 \text{ sek.}$

Magasinstemperatur, $T_M = 50^\circ\text{C}$
 Starttemperatur = $T_M + 50^\circ\text{C}$
 Fluid: Vatten, $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$
 Solperioder/molnperioder: 12/12 min.
 Solandel: 50%

Dag nr	87	174	348
Insamlad energimängd	0,929	1,682	0,045
			kWh/(m ² dag)



KLOCKAN

11 11
11 11
9 9
8 8
7 7
6 6
5 5
4 4
3 3
2 2
1 1

°C

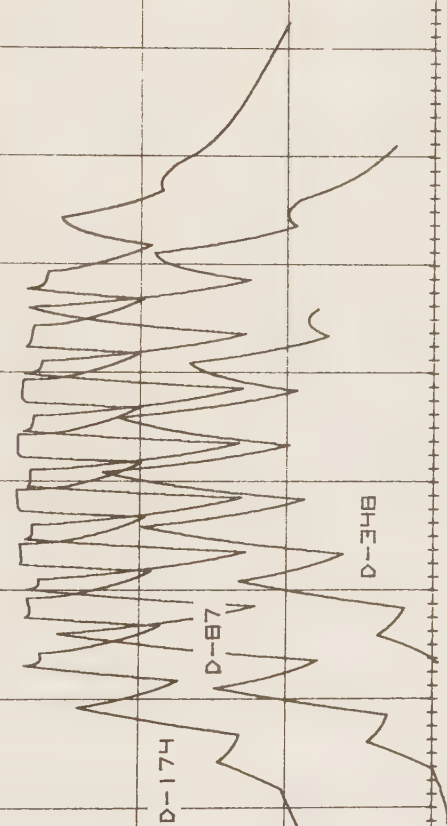
Ort: Lund
Plan solfångare
Lutning: 45° mot söder
(α) = 0,8 $U_L = 6,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Värmekapacitet, $C_C = 12,56 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$
Tidskonstant, $\tau_0 = 10^3 C_C U_L^{-1} = 2093 \text{ sek.}$

Magasinstemperatur, $T_M = 50^\circ\text{C}$
Starttemperatur = $T_M + 50^\circ\text{C}$
Fluid: Vatten, $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$
Solperioder/molnperioder: 30/30 min.
Solandel: 50%

Dag nr	87	174	348
Insamlad energi	0,510	1,360	0
insamlad			
energinäringd			

$\text{kWh/(m}^2\text{dag)}$

BILAGA 3



2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 KLOCKAN

BILAGA 4

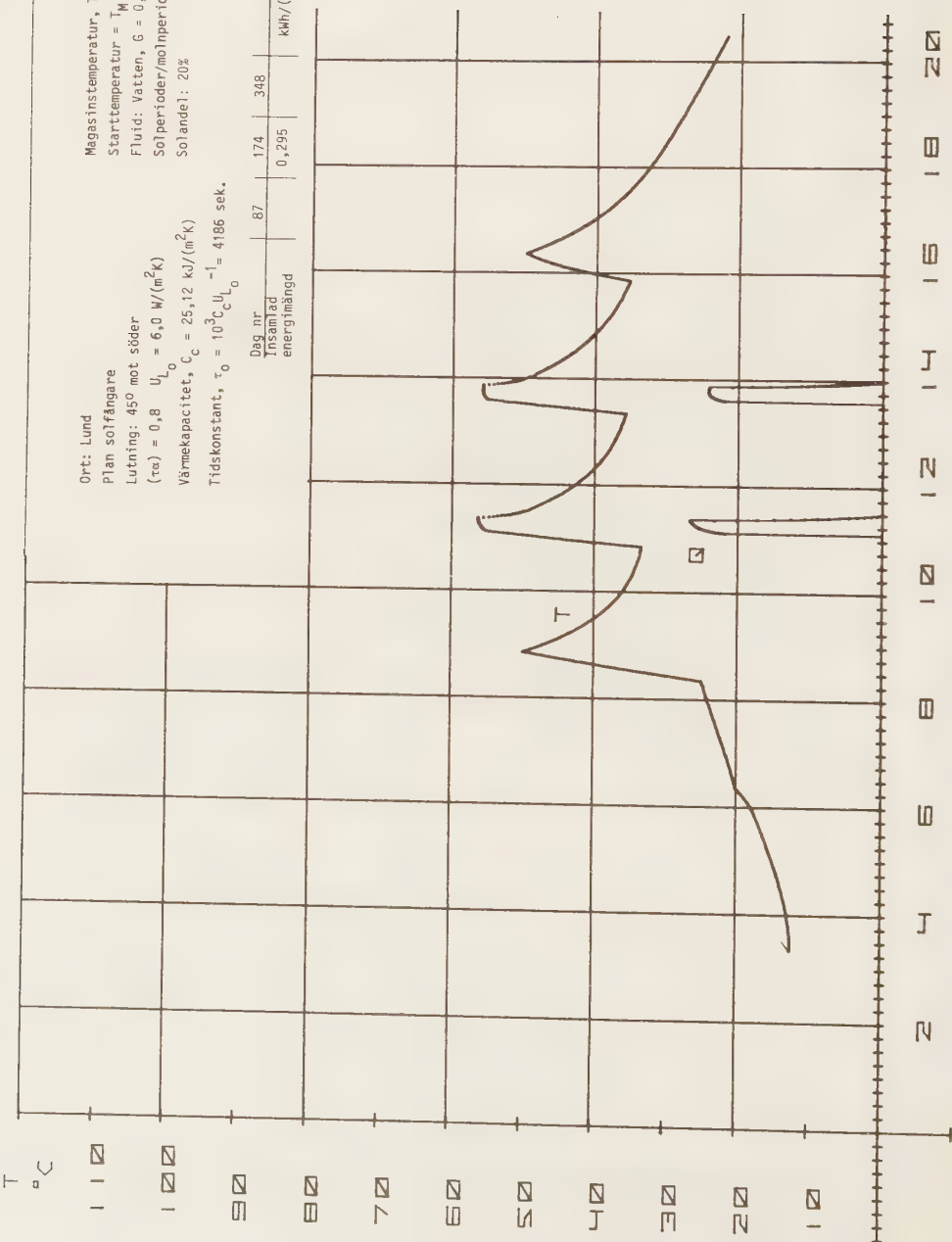
KLOCKAN

Ort: Lund
 Plan solfångare
 Lutning: 45° mot söder
 $(\tau_a) = 0,8$ $U_{L_0} = 6,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 Värmekapacitet, $C_c = 25,12 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$
 Tidskonstant, $\tau_0 = 10^3 C_c U_{L_0}^{-1} = 4186 \text{ sek.}$

Magasinstemperatur, $T_M = 50^\circ\text{C}$
 Starttemperatur = $T_M + 50^\circ\text{C}$
 Fluid: Vatten, $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$
 Solperioder/molnperiod: 30/120 min.
 Solandel: 20%

Dag nr	87	174	348
Tidsskift			
energinmängd			
kWh/(m ² dag)		0,295	

□ W/M²
 □ 1000

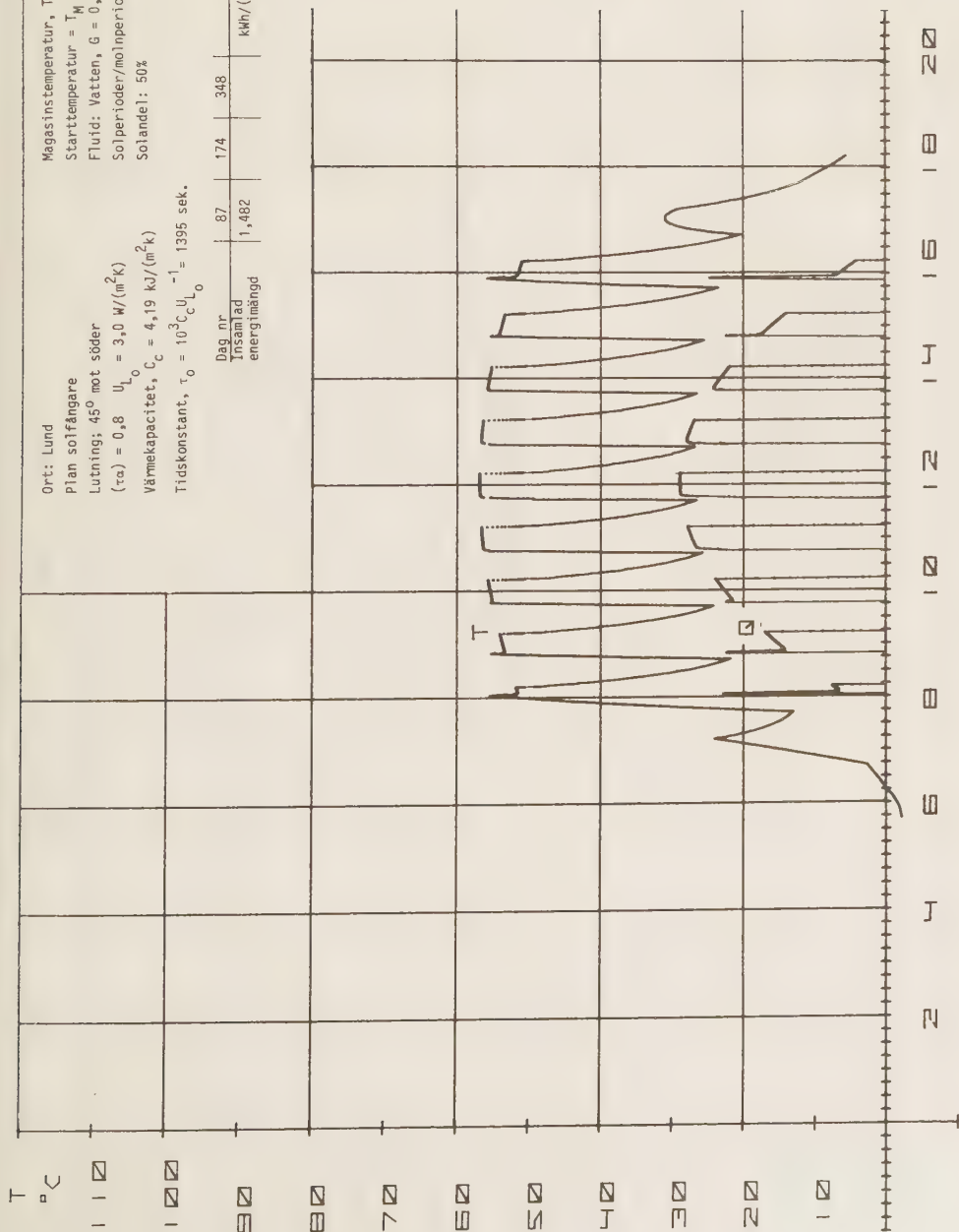


BILAGA 5

Ort: Lund
 Plan solfångare
 Lutning; 45° mot söder
 $(\tau_a) = 0,8$ $U_{L_0} = 3,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 Värmekapacitet, $C_c = 4,19 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$
 Tidskonstant, $\tau_0 = 10^{-2} C_c U_{L_0}^{-1} = 1395 \text{ sek.}$

Magasinstemperatur, $T_M = 50^\circ\text{C}$
 Starttemperatur = $T_M + 50^\circ\text{C}$
 Fluid: Vatten, $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$
 Solperioder/molnperioder: 30/30 min.
 Solandel: 50%

Dag nr	87	174	348
Insamlad energi/mängd	1,482		
			$\text{kWh/(m}^2\text{dag)}$

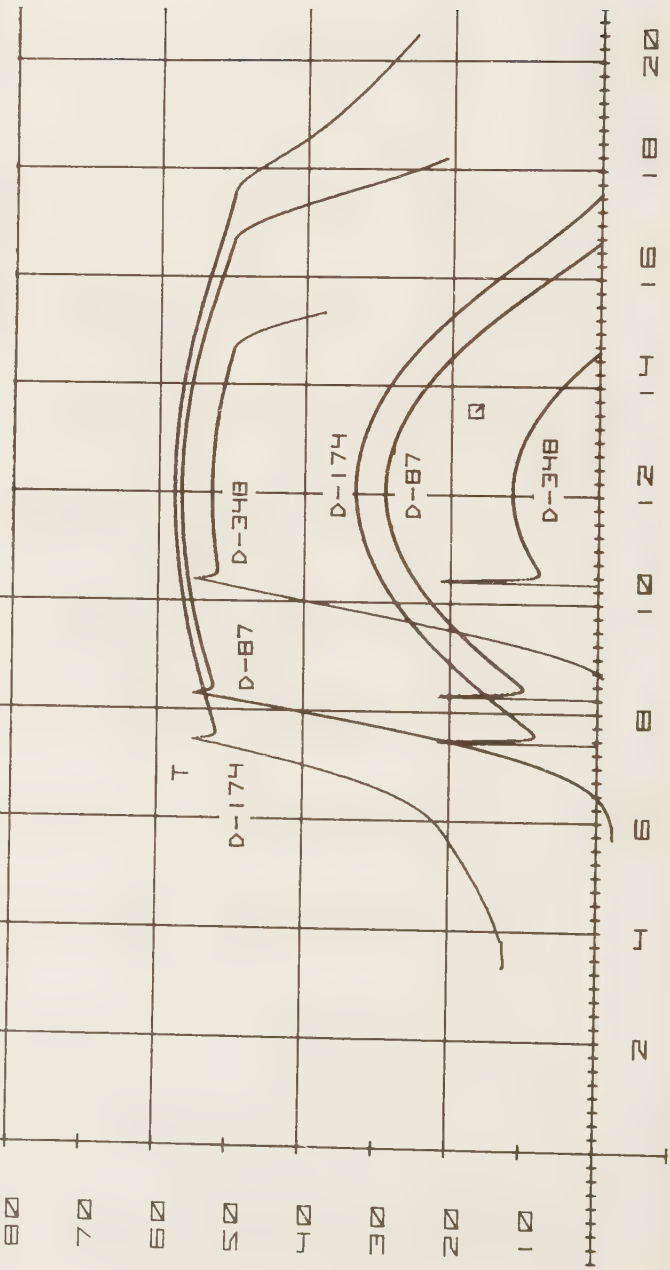


KLOCKAN

Ort: Lund
 Plan solfångare
 Lutning: 45° mot söder
 $(\alpha) = 0,8$ $U_L = 3,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 Värmekapacitet, $C_c = 12,56 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$
 Tidskonstant, $\tau_o = 10^3 C_c U_L^{-1} = 4186 \text{ sek.}$

Magasinstemperatur, $T_M = 50^\circ\text{C}$
 Starttemperatur = $T_M + 50^\circ\text{C}$
 Fluid: Vatten, $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$
 Solperioder/molnperioder: 100%/0
 Solandel: 50%

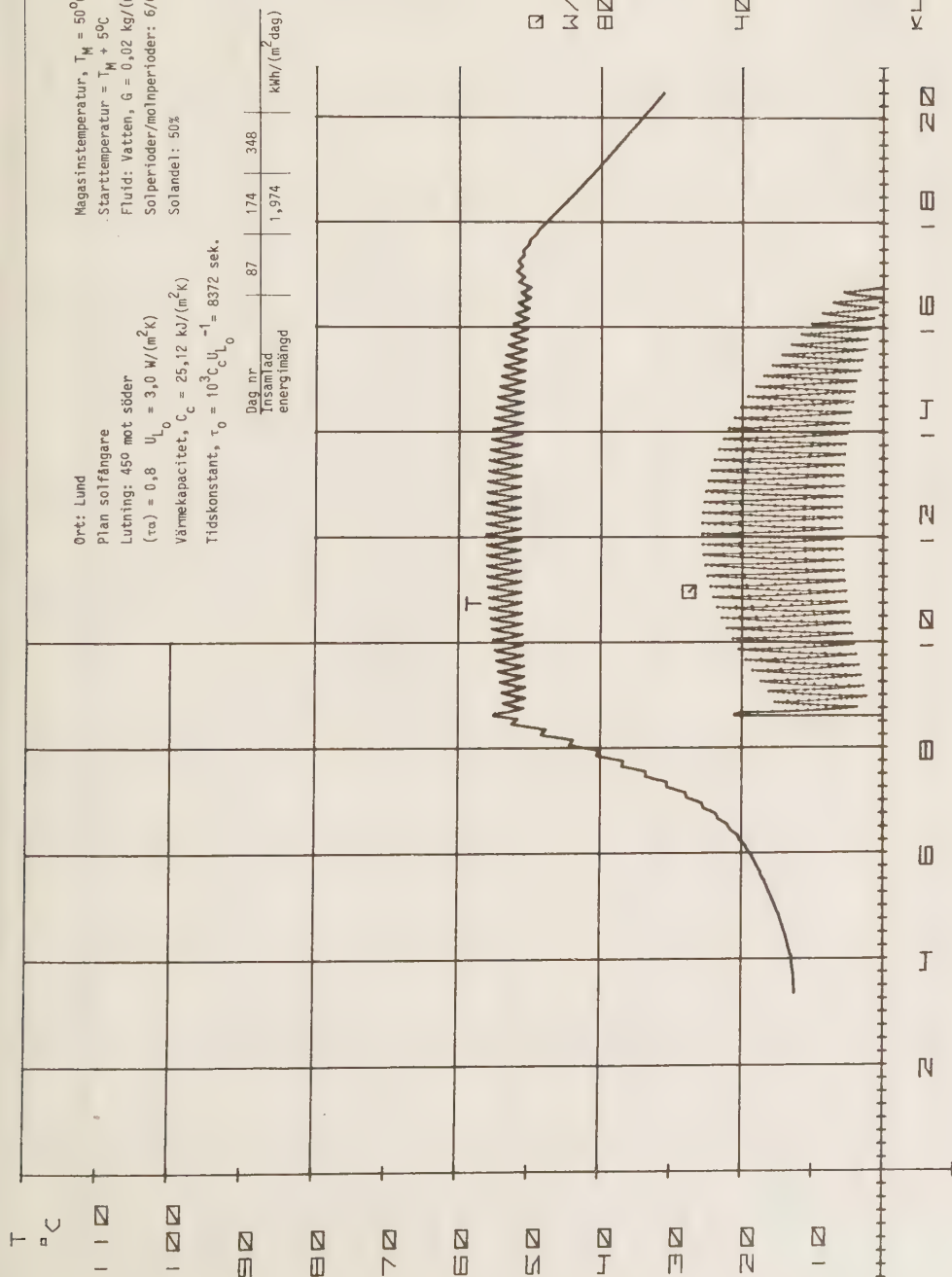
Dag nr	87	174	348
Insamlad energimängd	3,38172	4,52272	0,74872
	=1,690	=2,261	=0,374
			kWh/(m ² dag)



☐ W/M2
 800
 400

Ort: Lund
 Plan solfångare
 Lutning: 450 mot söder
 $(\tau\alpha) = 0,8$ $U_L = 3,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
 Värmekapacitet, $C_c = 25,12 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$
 Tidskonstant, $\tau_0 = 3^3 C_c U_L^{-1} = 8372 \text{ sek.}$

Magasinstemperatur, $T_M = 50^\circ\text{C}$
 Starttemperatur = $T_M + 50^\circ\text{C}$
 Fluid: Vatten, $G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$
 Solperioder/molperiod: 6/6 min.
 Solandel: 50%

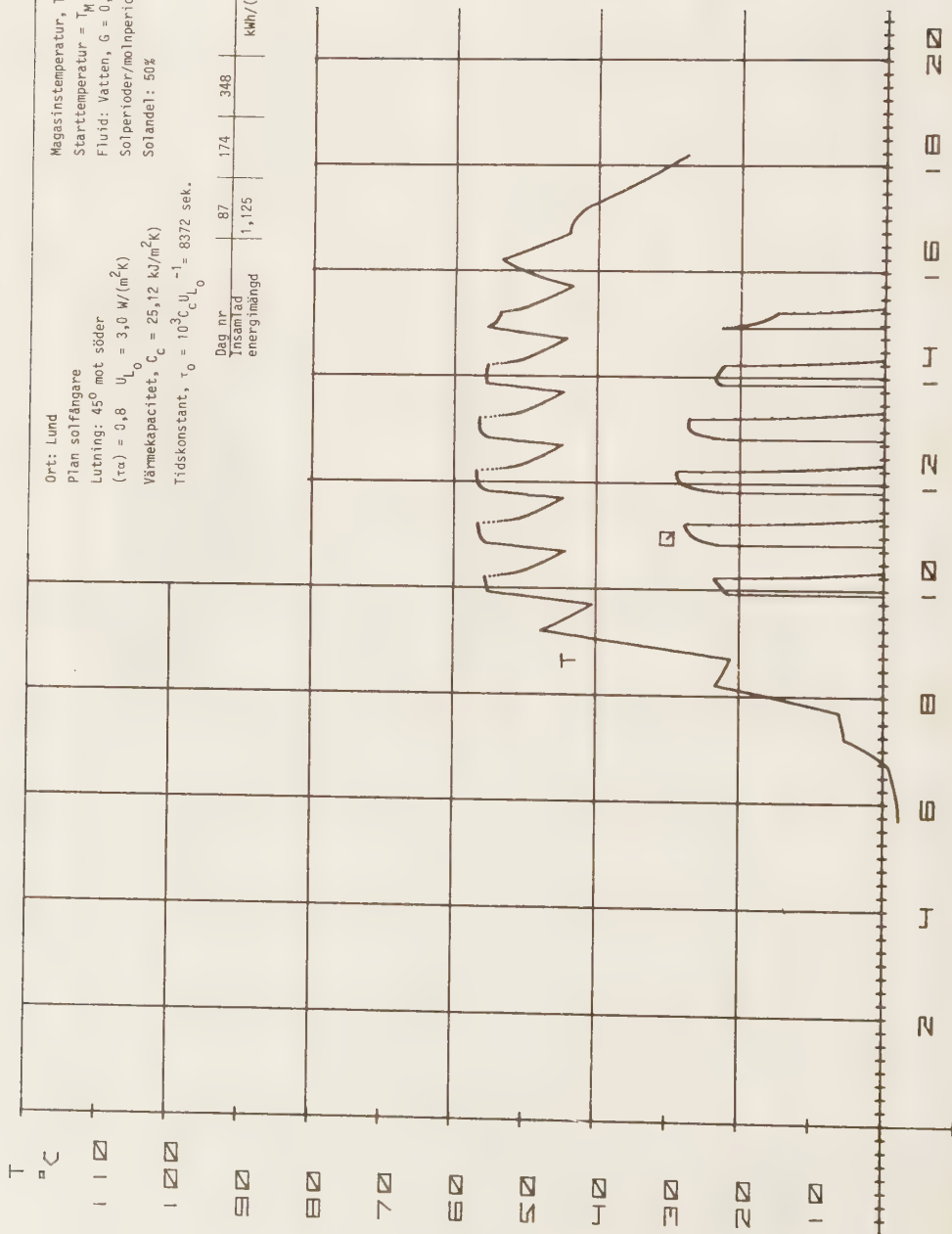


BILAGA B

Magasinstemperatur, $T_M = 50^\circ\text{C}$
 Starttemperatur = $T_M + 50^\circ\text{C}$
 Fluid: Vatten, $G = 0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$
 Solperioder/molnperioder: 30/30 min.
 Solandel: 50%

Ort: Lund
 Plan solfångare
 Luthing: 45° mot söder
 $(\tau_a) = 0,8$ $U_{L_0} = 3,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
 Värmekapacitet, $C_c = 25,12 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$
 Tidskonstant, $\tau_0 = 10^3 C_c U_{L_0}^{-1} = 8372 \text{ sek.}$

Dag nr	87	174	348
Innsolad energimängd	1,125		
			kWh/(m dag)



T
°C

110

100

90

80

70

60

50

40

30

20

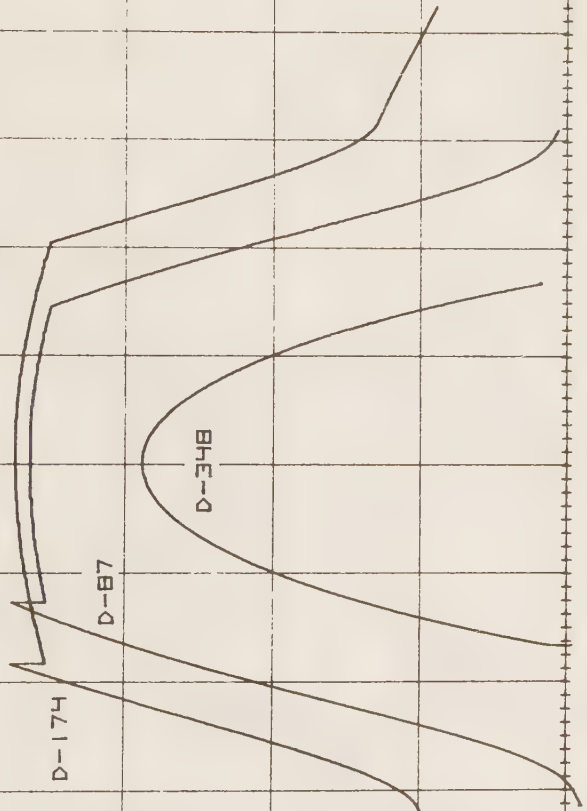
10

BILAGA 9

Ort: Lund
 Plan solfångare
 Lutning: 45° mot söder
 $(\tau_a) = 0,8$ $U_L = 6,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 Värmekapacitet, $C_c = 0,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$
 Tidskonstant, $\tau_o = 10^3 C_c U_L^{-1} = 35 \text{ sek.}$

Magasinstemperatur, $T_M = 70^\circ\text{C}$
 Starttemperatur = $T_M + 5^\circ\text{C}$
 Fluid: Vatten, $G = 0,002 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$
 Solperioder/molnperiod: 100%/0
 Solandel: 50%

Dag nr	87	174	348
Insamlad	0,897/2	2,096/2	0
energimängd	=0,449	=1,048	
			$\text{kWh/(m}^2\text{dag)}$



2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 KLOCKAN

Ort: Lund

Plan solfångare

Lutning: 45° mot söder

$$(\tau\alpha) = 0,8 \quad U_1 = 6,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Värmekapacitet, $C_C = 12,56 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$

Tidskonstant, $\tau_0 = 10^3 C U_l^{-1} = 2093 \text{ sek.}$

Magasintemperatur, $T_M = 70^\circ\text{C}$
$$\text{Starttemperatur} = T_M + 50^\circ\text{C}$$

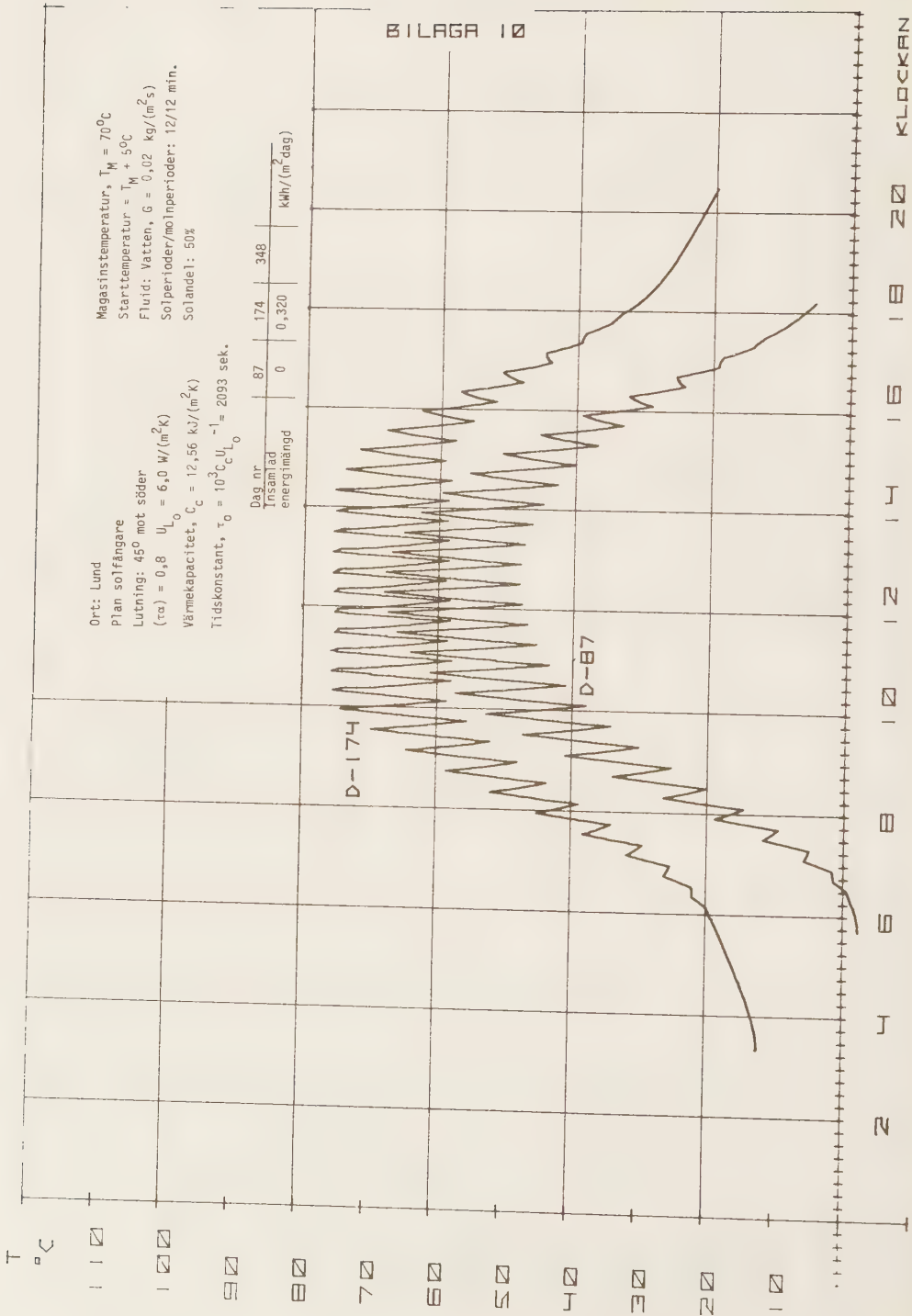
Fluid: Vatten, $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$

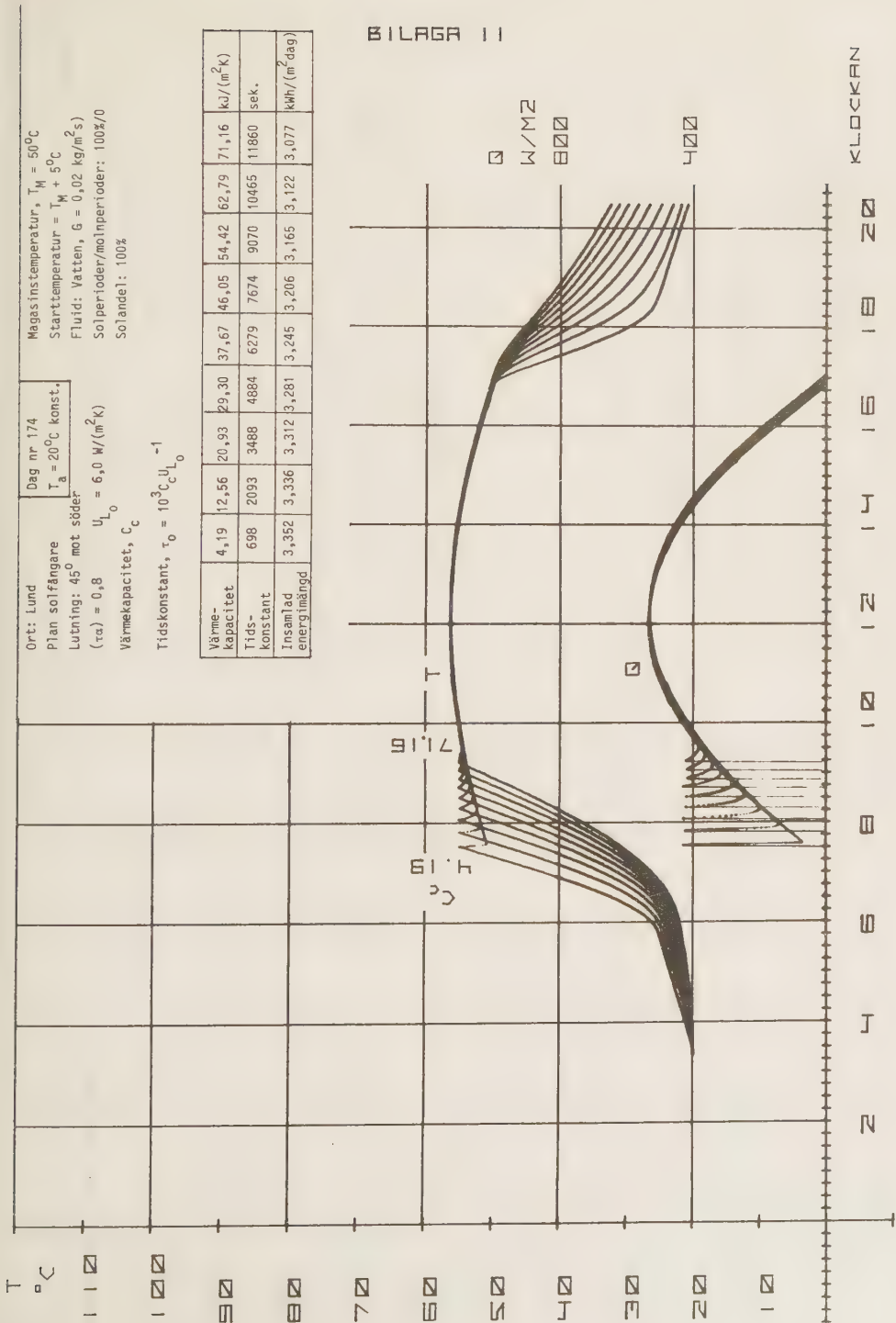
Sol period/mol period: 12/12 min.

Solandel: 50%

Dag nr	87	174	348
Insamlad energimängd	0	0,320	
			kWh/(m ² dag)

BILAGA 10





Ort: Lund
 Plan solfångare
 Lutning: 45° mot söder
 (α) = 0,8
 Värmekapacitet, C_o

Dag nr 174
 T_a = 20°C konst.
 U_L = 6,0 W/(m²·K)

Magasintemperatur, T_M = 50°C
 Starttemperatur = T_M + 5°C
 Fluid: Vatten, G = 0,02 kg/m²
 Solperioder/molperioder: 100%/0
 Solandel: 100%

Tidskonstant, τ_o = 10³ C_o U_L⁻¹

Värme- kapacitet	4,19	12,56	20,93	29,30	37,67	46,05	54,42	62,79	71,16	ku/(m ² ·K)
Tids- konstant	698	2093	3488	4884	6279	7674	9070	10465	11860	sek.
Insamlad energimängd	3,352	3,336	3,312	3,281	3,245	3,206	3,165	3,122	3,077	kWh/(m ² ·dag)

BILAGA 11

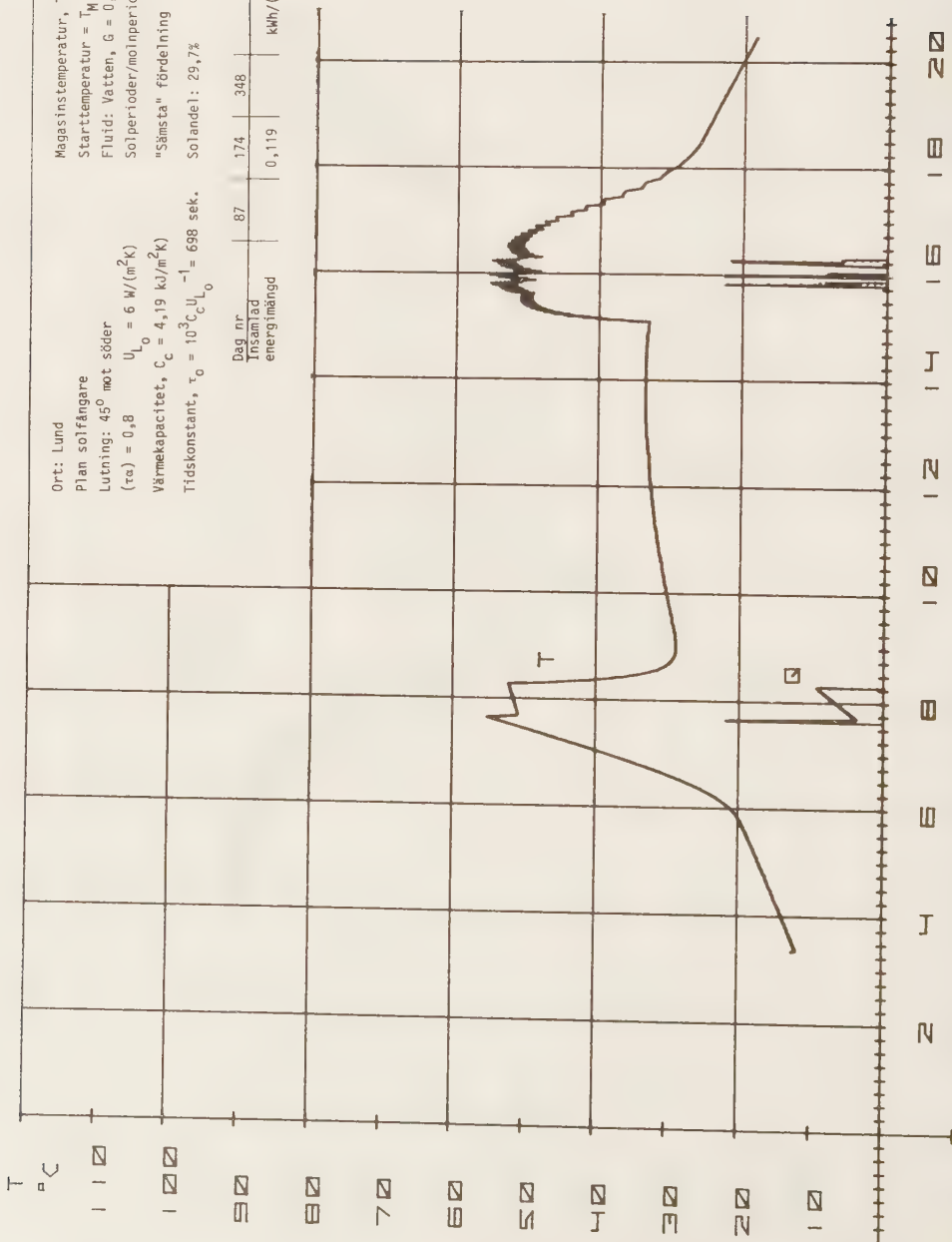
KLOCKAN

BILAGA 12

Ort: Lund
 Plan solfångare
 Lutning: 45° mot söder
 $(\tau_a) = 0,8$ $U_{L_0} = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 Värmekapacitet, $C_c = 4,19 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$
 Tidskonstant, $\tau_o = 10^3 C_c U_{L_0}^{-1} = 698 \text{ sek.}$

Magasinstemperatur, $T_M = 50^\circ\text{C}$
 Starttemperatur = $T_M + 5^\circ\text{C}$
 Fluid: Vatten, $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$
 Solperioder/molnperioder:
 "Sästa" fördelning
 Solandel: 29,7%

Dag nr	87	174	348
Inskälad energimängd		0,119	
			$\text{kWh/(m}^2\text{dag)}$



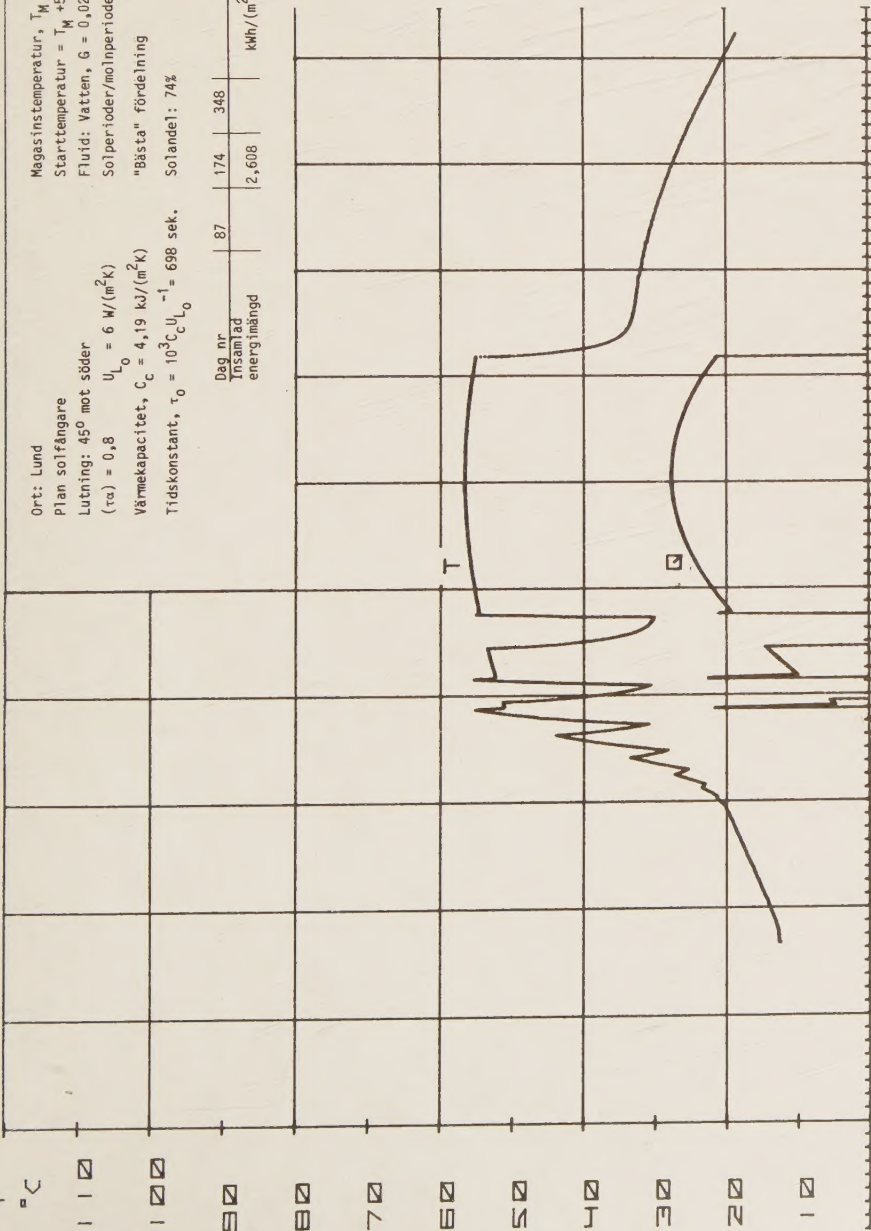
KLOCKAN

T
°C

Ort: Lund
 Plan solfångare
 Lutning: 45° mot söder
 $(\tau_a) = 0,8$
 $U_{L0} = 6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 Värmekapacitet, $C_c = 4,19 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$
 Tidskonstant, $\tau_0 = 10^3 C_c U_{L0}^{-1} = 698 \text{ sek.}$

Magasinstemperatur, $T_M = 50^\circ\text{C}$
 Starttemperatur = $T_M + 5^\circ\text{C}$
 Fluid: Vatten, $G = 0,02 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$
 Solperioder/molnperioder:
 "Bästa" fördelning
 Solandel: 74%

Dag nr	87	174	348
Insamlad energimängd		2,608	kWh/(m ² dag)



Q
 W/M2
 000
 1000

2 4 6 8 10 12 14 16 18 20

